Penyunting:
Milary Agung Widiawaty
Moh. Dede

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia

Upaya Berkelanjutan Menuju *Net Zero Emission*

Heni Susiati, Sriyana, Muhammad Setiawan Bahari, Fepriadi,
Moch. Djoko Birmano, Dedy Priambodo, Yohanes Dwi Anggoro,
Suparman, Ade Chandra Lesmana, Agus Aryanto

UNIVERSITAS ISLAM MALANG

UNISMA

MALANG – JAWA TIMUR – INDONESIA

https://unisma.ac.id

PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA NUKLIR DI INDONESIA

Upaya Berkelanjutan Menuju
Net Zero Emission

LEMBAGA PENDIDIKAN TINGGI

Nahdlatul Ulama

PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA NUKLIR DI INDONESIA

Upaya Berkelanjutan Menuju
Net Zero Emission

Penulis:
Heni Susiati
Sriyana
Muhammad Setiawan Bahari
Fepriadi
Moch. Djoko Birmano
Dedy Priambodo
Yohanes Dwi Anggoro
Suparman
Ade Chandra Lesmana
Agus Aryanto

UNSMA PRESS
2023

PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR DI INDONESIA
Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission

Penyunting:
Millary Agung Widiawaty
Moh. Dede

Penulis:
Heni Susiati, Sriyana, Muhammad Setiawan Bahari, Fepriadi, Moch. Djoko Birmano, Dedy Priambodo, Yohanes Dwi Anggoro, Suparman, Ade Chandra Lesmana, Agus Aryanto

Tata Letak : Ahmad Sofi
Cover : Aliyul Murtadlo

copyright © 2023

Penerbit

Unisma Press
Gedung Umar bin Khattab Kantor Pusat LT. 3,
Universitas Islam Malang
Jl. Mayjen Haryono 193 Malang, 65144
Telp. 0341-551932 ext 232
unismapress@unisma.ac.id

Cetakan Pertama : Maret 2023
Ukuran : 15,5 cm x 23 cm
Jumlah Halaman : xii + 140 halaman

Anggota IKAPI No.303/JTI/2021
ISBN: 978-623-5498-12-6

Hak cipta dilindungi oleh Undang-undang Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku tanpa izin tertulis dari Penerbit

Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0)
Karya berlisensi ini diperuntukkan untuk penggunaan personal dan komersial. Anda bebas menyebarluaskan dalam bentuk dan format apapun, termasuk memodifikasi dan membuat turunan dalam berbagai perantara bentuk asalkan tetap memberikan kredit kepada pembuat atau meminta timbal balik pada sumbernya.

SAMBUTAN I

Pada momen bahagia ini, saya selaku Deputi Bidang Kebijakan Pembangunan BRIN, ingin memperkenalkan sebuah buku berjudul "Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia: Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission". Buku ini merupakan sebuah karya yang berisi informasi penting mengenai pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), pemanfaatan nuklir sebagai energi hijau, kehadiran PLTN demi mencapai *net zero emission*, serta kesiapan infrastruktur pembangunan PLTN.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan energi yang ramah lingkungan, penggunaan energi nuklir sebagai salah satu sumber energi alternatif menjadi semakin penting. Buku ini memberikan gambaran tentang PLTN dan cara kerjanya, serta mengungkapkan keuntungan dari pemanfaatan nuklir sebagai energi hijau yang tidak menghasilkan emisi karbon. Selain itu, buku ini juga membahas tentang kehadiran PLTN sebagai langkah menuju *net zero emission*, yaitu kondisi dimana jumlah emisi yang dihasilkan sama dengan jumlah emisi yang diserap oleh lingkungan. *Net zero emission* menjadi tujuan yang sangat penting dalam mengurangi dampak perubahan iklim dan memberikan masa depan yang lebih baik bagi generasi yang akan datang.

Tidak hanya itu, buku ini juga membahas tentang kesiapan infrastruktur pembangunan PLTN, yang menjadi faktor kunci dalam keberhasilan program ini. Dengan infrastruktur yang memadai, pembangunan PLTN dapat dilakukan dengan efisien dan efektif, sehingga dapat mempercepat tercapainya tujuan *net zero emission*. Saya yakin bahwa buku ini akan memberikan banyak manfaat bagi pembaca yang ingin mengetahui lebih dalam tentang topik ini.

Deputi Bidang Kebijakan Pembangunan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Mego Pinandito

SAMBUTAN II

Saya merasa bangga untuk dapat memberikan sambutan untuk sebuah buku yang sangat penting dan menginspirasi, yakni "Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia: Upaya Berkelanjutan Menuju Net Zero Emission". Buku ini memiliki relevansi dan kepentingan yang tinggi, terutama bagi kita yang berada di Indonesia, sebuah negara yang sedang gencar membangun infrastruktur dan mengejar ketertinggalan dalam pemanfaatan teknologi terkini. Buku ini membahas topik yang sangat penting, yaitu pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), pemanfaatan nuklir sebagai sumber energi hijau, kehadiran PLTN untuk mencapai *net zero emission*, serta kesiapan infrastruktur pembangunan PLTN.

Teknologi PLTN adalah teknologi yang sangat maju dan memiliki potensi besar untuk memberikan pasokan listrik yang aman, dapat diandalkan, dan ramah lingkungan bagi masyarakat. Penggunaan nuklir sebagai sumber energi hijau juga sangat penting untuk mengurangi ketergantungan kita pada sumber energi fosil yang semakin langka dan mahal. Kehadiran PLTN menjadi langkah penting dalam upaya global untuk mencapai *net zero emission*, yang bertujuan mengurangi dampak perubahan iklim demi generasi kini dan

penerus umat manusia. Kehadiran PLTN akan mempercepat pencapaian tujuan tersebut dan memperkuat posisi Indonesia sebagai negara yang proaktif dalam mengatasi perubahan iklim.

Buku ini juga membahas kesiapan infrastruktur dalam pembangunan PLTN, yang merupakan faktor penting dalam kesuksesan program ini. Dengan infrastruktur yang memadai, pembangunan PLTN dapat dilakukan dengan lebih efisien dan efektif, sehingga dapat mempercepat pencapaian *net zero emission*. Karena itu, pembangunan infrastruktur harus terus ditingkatkan dan diupayakan secara berkelanjutan. Buku ini sangat penting dibaca dan dipelajari oleh semua orang, terutama bagi mereka yang ingin mengetahui lebih lanjut tentang teknologi PLTN.

Direktur Kebijakan Pembangunan Lingkungan Hidup,
Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran
BRIN

Muhammad Abdul Kholiq

PRAKATA

Puji syukur kami curahkan atas rahmat Tuhan Yang Maha Esa karena telah memberikan karunia dan anugerah hingga penulis bisa menyusun buku ini di tahun semester pertama tahun 2023. Saat ini, energi hijau semakin menjadi perhatian utama di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dan pemanfaatannya sebagai energi hijau adalah salah satu opsi yang dapat diambil untuk memenuhi kebutuhan energi yang bersih dan berkelanjutan. Buku "Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia: Upaya Berkelanjutan Menuju *Net Zero Emission*" mengulas secara lengkap dan komprehensif tentang PLTN, pemanfaatan nuklir sebagai energi hijau, kehadiran PLTN demi mencapai *net zero emission* (NZE), dan kesiapan infrastruktur pembangunan PLTN di Indonesia.

Perkembangan teknologi reaktor nuklir terus berlanjut dan diharapkan dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan memberikan sumber energi yang lebih bersih dan aman. Namun, penggunaan reaktor nuklir tetap memerlukan pengawasan dan pengelolaan yang sangat ketat untuk memastikan keselamatan dan keamanan. Buku menyajikan informasi untuk menambah pemahaman yang lebih luas dan mendalam bagi tentang energi nuklir dan

potensi penggunaannya sebagai sumber energi hijau masa depan. Para pembaca dapat menggunakan buku ini sumber referensi penting dalam memahami energi nuklir dan dampaknya pada lingkungan serta keberlanjutan energi.

Kami berharap buku ini telah memberikan gambaran yang jelas tentang energi nuklir dan potensi manfaatnya dalam memenuhi kebutuhan energi dunia yang semakin meningkat dan mengurangi emisi gas rumah kaca di masa depan. Semoga buku ini dapat membantu para pembaca untuk memahami peran penting energi nuklir dalam keberlanjutan energi dan memberikan inspirasi untuk mengembangkan solusi yang lebih efektif serta berkelanjutan.

Selamat membaca.

Heni Susanti

DAFTAR ISI

SAMBUTAN I | v
SAMBUTAN II | vii
PRAKATA | ix
DAFTAR ISI | xi

BAB I PENDAHULUAN | 1

BAB II MENGENAL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR | 9
1. Reaksi Nuklir | 10
2. Nuklir untuk Energi dan Bidang Lainnya | 13
3. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) | 17
4. Aneka Tipe PLTN | 26
5. Teknologi PLTN | 29

BAB III PEMANFAATAN NUKLIR SEBAGAI ENERGI HIJAU | 45
1. Belajar dari Negara Lain | 46
2. Pengembangan Energi Nuklir Nasional | 60
3. FOLU Net Sink dan Pembangunan Rendah Karbon | 63
4. Mengurangi Carbon Footprint Sektor Energi | 68

BAB IV KEHADIRAN PLTN DEMI MENCAPAI NET ZERO EMISSION | 75
1. Net Zero Emission (NZE) | 76
2. Strategi dan Implementasi NZE | 78
3. Tantangan Implementasi NZE | 82
4. PLTN dan Capaian NZE | 85

BAB V KESIAPAN INFRASTRUKTUR PEMBANGUNAN PLTN | 89
1. Tapak Potensial PLTN | 90
2. Life Cycle PLTN | 92
3. Integrasi Kelistrikan dan Infrastruktur Pendukung | 96
4. Transisi Energi | 100
5. Alih Teknologi dan Kesiapan Indonesia | 103

BAB VI PENUTUP | 109

DAFTAR PUSTAKA | 114
TENTANG PENULIS DAN EDITOR | 137

BAB_1

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global menjadi isu bersama yang masih terus diupayakan solusinya. Perubahan ini ditandai dengan meningkatnya suhu rata-rata bumi, yaitu pada atmosfer, daratan, dan lautan (Wu et al, 2022). Selain itu, dampak ekstrem yang ditimbulkan dapat memicu naiknya permukaan laut akibat menipisnya volume es yang mencair. Penyebab perubahan iklim salah satunya yaitu penggunaan energi tidak ramah lingkungan, terutama penggunaan bahan bakar fosil (minyak bumi, gas, dan batu bara) untuk kendaraan, industri, dan pembangkit listrik (Gani, 2021). Apabila kondisi ini terus dibiarkan, bukan hanya kerusakan lingkungan yang terjadi, tetapi juga kerugian sosial-ekonomi yang akan terus meningkat (Matsumoto, 2019). Sejauh ini, penggunaan energi fosil menjadi pilihan dikarenakan ketersediannya yang melimpah, kemudahan pengolahan, dan biaya yang relatif lebih terjangkau (*cost-effective* atau *reasonable priced*) (Cong, 2022). Namun, saat ini ketersediaannya semakin menipis karena terus-menerus digunakan. Selain itu, bahan bakar fosil terbentuk dari proses pengendapan makhluk hidup yang memerlukan waktu sangat lama, sehingga perlu dilakukan transisi yang dikenal dengan slogan *from unrenewable to renewable energy resources* (Stout & Wang, 2016).

Saat ini, perubahan iklim menjadi perhatian global, termasuk Indonesia, karena berpotensi menyebabkan kerugian ekonomi dan sosial yang besar. Menurut studi Bappenas, Indonesia dapat mengalami kerugian ekonomi

hingga 115 Triliun pada tahun 2024 akibat perubahan iklim. Oleh karena itu, mitigasi harus dilakukan di beberapa sektor untuk meminimalkan potensi kerugian tersebut. Salah satu upaya besar untuk menanggapi perubahan iklim adalah konferensi Perubahan Iklim Paris pada tahun 2015 yang menghasilkan Paris Agreement. Salah satu aspek penting dari perjanjian ini adalah Nationally Determined Contribution (NDC) yang memproyeksikan potensi penurunan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) di setiap negara peserta setelah tahun 2020 (Sulistiawati, 2020). Sebagai negara yang peduli dengan masyarakatnya, Indonesia telah meratifikasi Paris Agreement dan menyerahkan dokumen NDC dengan target penurunan emisi GRK sebanyak 29% (dengan kemampuan mandiri) atau 41% (dengan adanya bantuan internasional) pada 2030 (Hindarto et al., 2018).

Berbagai upaya terus dilakukan untuk mengurangi emisi karbon. Upaya ini dapat dilihat dari keterlibatan Indonesia dalam menargetkan nol emisi pada tahun 2060 sesuai arahan United Nations Framework Convention on Climate Change atau UNFCCC (Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim) (Hakam et al, 2022). UNFCCC merupakan perjanjian antar pemerintah internasional yang ditandatangani pada tahun 1992 dan bertujuan untuk mengatasi perubahan iklim dengan menstabilkan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer pada tingkat yang aman. UNFCCC menetapkan kerangka kerja bagi negara-negara peserta untuk mengembangkan strategi mitigasi dan adaptasi untuk menghadapi dampak perubahan iklim. Indonesia optimis dalam mencapai target tersebut karena memiliki sumber daya alam yang beragam sehingga

banyak pilihan yang dapat dijadikan sebagai sumber energi. Sejumlah energi terbarukan seperti angin, air, surya, dan panas bumi dimanfaatkan untuk pembangkit listrik (Langer et al, 2021). Sumber energi baru dan terbarukan memiliki banyak kelebihan, salah satunya yaitu menghasilkan sedikit emisi gas rumah kaca terutama karbon dioksida (CO_2). Namun, sebagian besar energi alternatif yang tersedia memiliki keterbatasan terkait dengan lokasi geografis dan kondisi cuaca (Maradin, 2021).

Sumber energi terbarukan menghasilkan energi yang lebih sedikit dibandingkan bahan bakar fosil. Saat ini, produksi energi dari sumber energi terbarukan masih belum mencukupi dalam memenuhi kebutuhan pasokan listrik di Indonesia. Seperti negara lain, Indonesia berharap mampu mencapai tujuan yang dijelaskan dalam dokumen NDC yang diserahkan kepada UNFCCC. Dokumen NDC mengatur target mitigasi yang ditetapkan oleh masing-masing negara untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dalam rentang waktu tertentu. Pencapaian target NDC merupakan kemajuan dalam memenuhi komitmen yang telah ditetapkan oleh suatu negara untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Jika suatu negara berhasil mencapai target NDC-nya, maka dapat membantu mengurangi dampak perubahan iklim di seluruh dunia.

Beberapa sektor utama seperti kehutanan, pertanian, industri, limbah, dan energi turut berpartisipasi dalam usaha penurunan emisi. Saat menghadiri Konferensi Perubahan Iklim ke-26 di Glasgow (COP26), Presiden Jokowi menyatakan bahwa Indonesia optimis dalam mencapai target penurunan emisi sebesar 29% pada tahun 2030. Pemerintah telah

menciptakan skenario pembangunan rendah karbon untuk mendukung pencapaian target NDC. Sejalan dengan Paris Agreement, Indonesia diharapkan dapat mencapai puncak emisi Gas Rumah Kaca (GRK) pada tahun 2030 dan kemudian menurun secara signifikan hingga mencapai Net Zero Emission (NZE) pada 2060, lebih cepat maka akan lebih baik. Skenario ini memerlukan upaya bersama untuk mengurangi emisi dari sektor energi hingga mendekati nol, seperti yang tertera dalam Indonesia's Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (LTS-LCCR 2050).

Nuklir menjadi salah satu opsi yang memungkinkan sebagai energi alternatif. Berdasarkan penelitian Brook et al (2014), nuklir merupakan energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan apabila dikelola dengan cermat. Banyak negara yang berhasil memanfaatkan nuklir sebagai energi alternatif seperti Rusia, Iran, Prancis, dan Amerika. Beberapa daerah di Indonesia seperti Kalimantan Barat, Bangka Belitung, dan Riau memiliki cadangan uranium yang cukup melimpah (Syaeful et al, 2021; Syaeful & Suharji, 2018). Indonesia memulai keseriusannya dalam mengkaji nuklir dengan membangun lembaga dan pusat studi nuklir di Serpong, Bandung, dan Yogyakarta.

Hingga saat ini, kajian terkait nuklir masih terus berjalan seperti pemetaan sebaran uranium, menentukan kesesuaian lokasi PLTN, dan pengelolaan limbah radioaktif (Putri et al, 2022; Susiati et al, 2022a; Wisnubroto, 2021). Langkah tersebut merupakan upaya serius guna memaksimalkan potensi yang ada. Penggunaan nuklir diharapkan mampu mewujudkan Net Zero Emission di Indonesia untuk masa yang akan datang (Holechek et al, 2022). Jalan panjang pengembangan PLTN

telah berlangsung dari beberapa dekade sebelumnya, tetapi hingga saat ini belum berhasil membangun pembangkit yang dapat dioperasikan. Sementara itu, Indonesia dahulunya merupakan *pioneer* di Asia Tenggara untuk urusan pengembangan energi nuklir. Maka dari itu, perlu adanya upaya nyata agar saat ini dan di masa mendatang kita tidak tertinggal dari negara lain. Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) telah Menyusun 'Visi Indonesia' mengenai pembangunan PLTN dengan ratusan miliar dana para pembayar listrik mulai dari pelelehan parsial reaktor teknologi reaktor, hingga teknologi pengelolaan limbah nuklir.

Menurut hasil penelitian dari Bappenas, pada tahun 2060 nuklir dapat memberikan sekitar 18% dari total kapasitas pembangkit energi nasional. Selain upaya untuk meningkatkan penggunaan sumber energi bersih, peta jalan menuju netralitas karbon juga memiliki beberapa target penting lainnya, seperti mengurangi intensitas penggunaan energi, meningkatkan elektrifikasi di sektor transportasi secara bertahap, menggunakan hidrogen sebagai sumber energi transportasi, menghapus subsidi bahan bakar fosil secara bertahap hingga tahun 2030, serta menerapkan nilai pengimbangan karbon yang sesuai untuk mempercepat transisi ke netralitas karbon. Menurut peta jalan tersebut, penggunaan PLTN diproyeksikan mencapai 5 GWe pada tahun 2041-2050 dan 30 GWe pada tahun 2050-2060. Untuk mencapai target netralitas karbon sesuai peta jalan tersebut, dibutuhkan tindakan dan kebijakan strategis terkait infrastruktur dan pelaksanaan proyek pembangunan, antara lain:

1. Segera membentuk suatu lembaga seperti Nuclear Energy Program Implementing Organization (NEPIO) guna mempercepat proses persiapan pembangunan PLTN di Indonesia sesuai peta jalan menuju NZE.
2. Segera melakukan pembangunan PLTN pertama pada tahun 2025 sebagai realisasi utama.
3. Pilih teknologi generasi reaktor yang telah teruji dari penyedia teknologi PLTN yang berpengalaman berkaliber internasional.
4. Menyusun *roadmap* transfer teknologi yang komprehensif hingga target kemandirian teknologi PLTN dengan melibatkan seluruh pemangku kepentingan.
5. Segera menentukan beberapa tapak PLTN yang mampu menampung pembangunan PLTN sebesar 18 GWe.
6. Menyiapkan regulasi pembangunan PLTN *non-land based* dengan teknologi selain Light Water Reactor (LWR). Hal ini untuk memastikan program pembangunannya terlaksana dengan baik dan memenuhi kaidah-kaidah nasional maupun internasional.

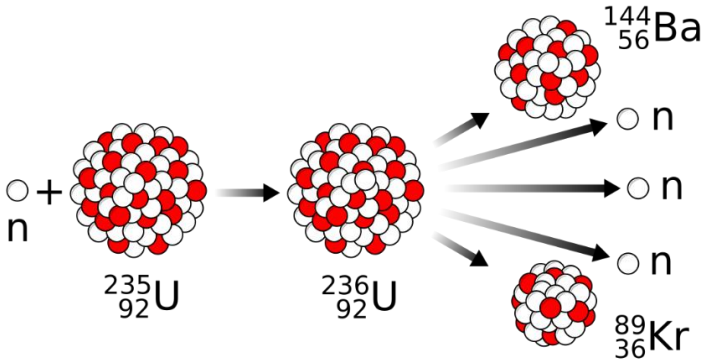
IKATAN SARJANA
Nahdlatul 'Ulama

BAB_2

MENGENAL PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR

1. REAKSI NUKLIR

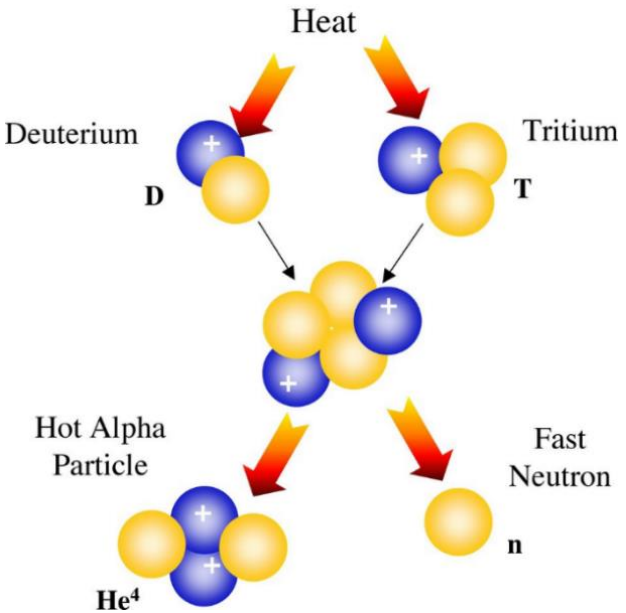
Unsur radioaktif merupakan zat yang yang tidak stabil dan selalu memancarkan energi. Secara umum, unsur ini memiliki nomor atom yang tinggi. Terdapat beberapa unsur yang dikategorikan sebagai radioaktif, yaitu Uranium (U), Plutonium (Pu), Thorium (Th), Curium (Cm), dan Radon (Rn). Uranium bernomor atom 92 dan thorium bernomor atom 90 merupakan unsur bernomor atom tertinggi yang terdapat dalam alam. Sedangkan plutonium dan curium tidak terdapat di alam (unsur buatan). Radon terdapat di alam dengan jumlah yang sangat terbatas (IAEA, 2009). Unsur radioaktif salah satunya dimanfaatkan untuk menghasilkan energi nuklir. Nuklir berasal dari bahasa Latin *nucleus* yang artinya inti atom. Energi nuklir adalah energi yang dihasilkan dari reaksi inti. Terdapat dua macam reaksi ini, yaitu reaksi fisi (reaksi pembelahan) dan reaksi fusi (reaksi penggabungan) yang keduanya mampu menghasilkan suatu energi yang sangat besar (Susdarwono, 2021).



Gambar 2.1 Reaksi fisi uranium-235.
(Sumber: MikeRun via Wikimedia, 2017)

a. Reaksi Fisi

Semua atom terdiri dari inti proton dan neutron yang dikelilingi oleh awan elektron. Secara umum, unsur dengan nomor massa atom rendah memiliki jumlah neutron dan proton yang sama di dalam inti karena susunan ini merupakan konfigurasi yang paling stabil (Chaplin, 2015). Pada reaktor nuklir, terjadi reaksi fisi inti yang sangat besar dengan nomor massa yang lebih besar dari 230, dan cenderung tidak stabil serta dapat memecahkan inti menjadi dua bagian atau lebih. Reaksi fisi bukan merupakan reaksi yang spontan dan dapat terjadi ketika neutron yang bergerak dengan kecepatan rendah menabrak inti yang tidak stabil. Pada nuklir, energi fisi diubah menjadi panas yang digunakan untuk menghasilkan uap (Tokimatsu et al., 2003).



Gambar 2.2 Reaksi fusi, lazim terjadi pada matahari atau bintang. (Sumber: US Department of Energy via Public Domain, 2014)

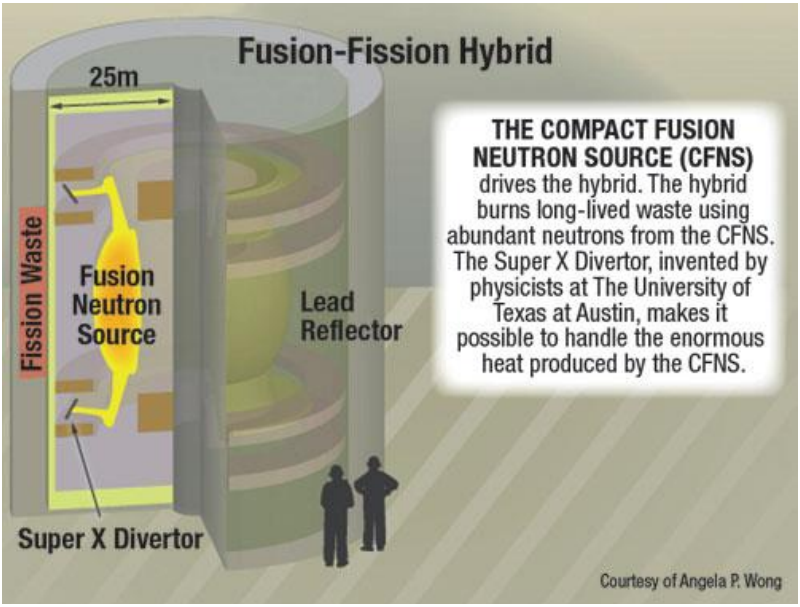
b. Reaksi Fusi

Proses penggabungan inti ringan lalu membentuk atom yang lebih berat dikenal sebagai reaksi fusi (Dittmar, 2012). Reaksi ini tidak bersifat radioaktif dan tidak menghasilkan produk sampingan seperti yang dihasilkan pada reaksi fisi. Sebelum dua inti ringan disatukan, keduanya harus mengatasi gaya tolak Coulomb. Sementara itu, fisi dapat terjadi dengan neutron yang tidak memiliki penghalang gaya Coulomb dan dapat digunakankan dengan partikel energi rendah. Saat ini, hanya sedikit negara yang mengembangkan reaktor fusi nuklir. hHl ini disebabkan karena reaktor fusi belum mampu beroperasi dengan stabil untuk durasi waktu yang lama seperti yang terjadi pada matahari dan bintang lain pada umumnya (Takeda et al., 2016). Selain itu, untuk memproduksi energi dibutuhkan energi yang jauh lebih besar untuk memicu reaksi fusi. Alasan lain yaitu panas yang dihasilkan sangat tinggi sehingga dapat membuat wadah penyimpanan seperti bejana meleleh. Sebagai contoh Tiongkok dan Prancis yang saat ini sedang mengembangkan reaktor fusi hanya mampu menghasilkan arus listrik dalam jumlah yang kecil.

c. Nuclear Fusion-Fission Hybrid

Nuclear Fusion-Fission Hybrid merupakan sebuah konsep dalam riset nuklir yang melibatkan penggunaan gabungan dari proses fusi dan fisi nuklir untuk menghasilkan listrik (Piera et al., 2010). Neutron yang bertegangan tinggi dari reaktor fusi digunakan untuk memicu fisi pada bahan bakar non-fosil. Keuntungannya tidak hanya membuat desain fusi lebih ekonomis, tetapi juga mampu membakar bahan

bakar yang tidak cocok untuk digunakan di pabrik fisi konvensional. Pada tahun 1977, reaktor hibrida pertama kali dikembangkan di Rusia. Konsep ini masih dalam tahap penelitian dan pengembangan agar dapat menghasilkan sistem hibrida fusi-fisi nuklir yang lebih praktis (Velikhov, 2014).



Gambar 2.3 Reaksi hibrida yang dikembangkan oleh University of Texas, Austin. (Sumber: Angela P. Wong via Engineering-News Report, 2009)

2. NUKLIR UNTUK ENERGI DAN BIDANG LAINNYA

Mayoritas orang memiliki sentimen buruk bahwa nuklir hanya dapat memicu radiasi berbahaya yang merusak lingkungan dan menyebabkan kematian makhluk hidup. Tanpa mereka sadari, nuklir telah banyak membantu kehidupan manusia. Nuklir banyak dimanfaatkan pada

berbagai bidang karena memiliki banyak kelebihan dibanding energi lainnya. Bahan radioaktif dalam nuklir lazim digunakan oleh industri, penelitian, medis dan biologi serta aplikasi teknis lainnya. Berikut adalah bidang-bidang yang mengaplikasikan teknologi nuklir.

a. Listrik dan Transportasi

Permintaan energi semakin meningkat seiring pertumbuhan penduduk yang cepat, sehingga perlu solusi agar kebutuhan energi terpenuhi (Owusu & Sarkodie, 2016). Nuklir dimanfaatkan sebagai energi alternatif karena mampu menghasilkan sedikit emisi dan limbah (Sadekin et al, 2019). Negara seperti Amerika, Prancis, Ukraina, Tiongkok, Rusia, dan Korea selatan bergantung pada nuklir dengan membangun PLTN. Rumah tangga dan industri merupakan sektor utama yang membutuhkan pasokan listrik. Selain itu, saat ini energi listrik bukan hanya digunakan untuk menghidupkan peralatan rumah tangga dan industri, tetapi juga digunakan sebagai bahan bakar kendaraan.

b. Antariksa

Nuklir telah berkontribusi terhadap produksi listrik dan panas dalam misi eksplorasi ruang angkasa. Robot Perseverance milik NASA yang dilengkapi teknologi nuklir berhasil mendarat di Mars pada 18 Februari 2021 (NASA, 2022). Generator termoelektrik radioisotop adalah jenis generator yang paling umum, serta telah digunakan untuk berbagai misi antariksa dan penerbangan berawak ke bulan. Radioisotop ditenagai oleh radioaktif nuklir yang mampu menjaga kestabilan suhu pada komponen agar tidak terlalu

dingin. Selain itu, reaktor fisi kecil seperti reaktor nuklir TOPAZ juga telah diterbangkan sebagai satelit untuk mengamati bumi (Bennett, 1989). Nuklir digunakan karena memiliki sistem yang aman, andal, dan berkelanjutan dalam menyediakan daya dan panas bagi pesawat ruang angkasa dan instrumentasi ilmiahnya.

c. Kesehatan

Bidang Kesehatan memerlukan nuklir untuk perawatan pasien dengan menargetkan dan menghancurkan organ atau jaringan yang rusak atau sakit. Pengobatan nuklir memanfaatkan zat radioaktif untuk mendiagnosis kerja organ atau jaringan yang berfungsi atau tidak (Kharfi, 2013). Umumnya nuklir *medicine imaging* dikombinasikan dengan radioisotop untuk menemukan tumor dan berbagai anomali. Terapi ini mampu membunuh jaringan kanker, mengurangi ukuran tumor, dan mengurangi rasa sakit (Kramer-Marek & Capala, 2012). Penyakit-penyakit yang bisa didiagnosis dengan terapi ini antara lain gangguan darah, penyakit jantung, penyakit kandung empedu, penyakit tiroid, masalah paru-paru, masalah tulang, penyakit ginjal, dan kanker (Vahidfar et al, 2022).

d. Pertanian

Saat ini banyak negara yang memanfaatkan nuklir untuk mengembangkan pertanian. Teknologi ini dikembangkan oleh dua organisasi yaitu International Atomic Energy Agency (IAEA) dan Food and Agriculture Organization (FAO) dalam meningkatkan penggunaan nuklir dalam bidang pertanian (Human, 2011). Radiasi nuklir digunakan untuk mengubah

sifat genetik tanaman dan benih sehingga tanaman menjadi tahan hama, parasit, dan bakteri tanpa menggunakan pestisida berbahaya (Bagher et al., 2014). Dengan teknologi nuklir, petani dapat meningkatkan biokontrol terhadap hama serangga seperti yang dilakukan di negara-negara Afrika. Selain itu, nuklir dapat meningkatkan efisiensi produksi sayuran dan tanaman pangan hanya dengan irigasi skala kecil, seperti yang dikembangkan di Sudan dan Benin. Sistem ini memantau air tanah dengan teknik nuklir yang memungkinkan para petani untuk menjadwalkan lokasi dan waktu irigasi tanaman secara tepat, sehingga hasil panen yang didapat semakin meningkat sejalan dengan meningkatnya kualitas air dan tanah. Pada akhirnya, teknologi nuklir dalam pertanian dapat membantu penduduk mengatasi kelaparan dan gagal panen akibat perubahan iklim dan kemiskinan. Perlahan-lahan, dengan menerapkan teknologi nuklir, perekonomian suatu negara dapat meningkat.

e. Penyelidikan Kejahatan

Salah satu cabang ilmu yang mempelajari tindakan kriminal yaitu ilmu forensik. Ilmu ini mempelajari pemeriksaan bukti-bukti yang ditemukan berupa bukti fisik, biologis, perilaku, dan dokumen penting lainnya. Tujuan forensik adalah menemukan keterkaitan antara orang, tempat, benda, dan peristiwa. Dalam ilmu forensik terdapat cabang ilmu yang dikenal sebagai *nuclear forensic*. Dengan mengandalkan *nuclear forensic*, suatu benda dapat terdeteksi apabila terkontaminasi oleh bahan beracun dan berbahaya terutama zat radioaktif yang biasanya diseludupkan oleh pelaku kejahatan. Sinar-X, neutron, dan ion pada zat radiokatif

memiliki banyak kelebihan dibandingkan metode lainnya sebab dapat menganalisis bukti dengan sangat akurat. Dengan demikian, ahli *nuclear forensic* dapat dengan mudah menyimpulkan sumber dan pemiliknya. Pembunuh juga dapat terlacak dengan cara menganalisis sampel yang diperoleh penyidik, bahkan jejak kecil dapat terdeteksi, seperti elemen dalam sehelai rambut, air liur, kuku, atau sisa tembakan senjata (Varga et al., 2022). Sebagai contoh, sampel rambut dari usia, jenis kelamin, dan kondisi kesehatan seseorang dapat menjadi indikator tinggi atau rendahnya zat tertentu. Kandungan *zink* pada wanita hamil cenderung rendah, dan tinggi pada anak-anak kurang nutrisi, sedangkan orang tua menunjukkan kandungan tinggi tembaga (IAEA, 2015a).

3. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR (PLTN)

Pada tahun 1954, PLTN pertama dibangun di Obninsk (Uni Soviet) dan beroperasi pada bulan Juli dengan kapasitas 5 MW yang kemudian ditingkatkan menjadi 10 MW (Ichikawa, 2016). Meski desain reaktor nuklir ini mirip dengan tipe Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy (RBMK) yang ada di Chernobyl, tetapi hingga tahun 2007 masih ada 12 PLTN jenis RBMK yang beroperasi di Rusia dan negara-negara Eropa Timur lainnya. PLTN Calder Hall di Inggris dianggap sebagai PLTN komersial pertama setelah beroperasi pada tahun 1956 dengan kapasitas 37 MW (Kwak, 2016). Reaktor nuklir ini menggunakan moderator grafit dan gas CO2 sebagai pendingin teras, kemudian kapasitasnya ditingkatkan secara bertahap hingga mencapai 196 MW.

Namun, operasional PLTN ini berakhir pada 31 Maret 2003. Sementara itu, PLTN Shippingport di Amerika Serikat adalah tipe PWR pertama yang dibangun untuk tujuan komersial dan beroperasi pada tahun 1957 dengan kapasitas 60 MW. Sebaliknya, PLTN Calder Hall di Inggris digunakan untuk produksi plutonium sebagai bahan untuk bom atom. PLTN Shippingport dihentikan operasinya pada tanggal 1 Oktober 1982 setelah beroperasi selama 25 tahun, dan kemudian didekomisi pada tahun 1985 hingga 1988. Saat ini, tipe reaktor PWR lebih banyak digunakan daripada jenis reaktor nuklir lainnya seperti BWR atau HWR.

> "RBMK merupakan jenis reaktor nuklir air berpendingin yang digunakan di Uni Soviet. Desain reaktor RBMK didasarkan pada teknologi reaktor nuklir Kanada yang diubah untuk memenuhi kebutuhan Uni Soviet. Reaktor ini memiliki banyak saluran bahan bakar yang terletak di dalam blok grafit yang digunakan sebagai moderator. Pendingin air digunakan untuk mendinginkan bahan bakar dan menghasilkan uap yang digunakan untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik. Reaktor RBMK memiliki kapasitas yang besar, bisa mencapai 1000 MW, dan dapat menghasilkan cukup plutonium untuk membuat senjata nuklir. Setelah bencana Chernobyl, sebagian besar RBMK di Uni Soviet diperbaiki dan dilengkapi dengan sistem keamanan yang lebih baik, sehingga ia masih beroperasi hingga saat ini."

Pada tahun 1966-1968, Amerika Serikat membangun PLTN dalam jumlah besar, yaitu sebesar 20000 MW per tahun. Tipe reaktornya sebagian besar terdiri dari PWR dan BWR yang merupakan hasil pengembangan dari desain reaktor kapal selam. Negara-negara industri lainnya seperti Prancis,

Jepang, Jerman, dan Swedia juga membangun PLTN menggunakan tipe reaktor yang berbeda. PLTN juga turut dibangun di negara berkembang (Choudary, 2020). India menjadi negara berkembang pertama yang memilikinya. Operasional PLTN India berada di Tarapur yang berlangsung sejak tahun 1969 dengan jenis BWR yang dipasok dari General Electric (GE) (Patil et al., 2012). India sukses mengoperasikan PLTN kedua yang bernama Kanupp (Karachi Nuclear Power Plant) dengan jenis HWR. Jumlah PLTN di seluruh dunia pada tahun 1970 telah mencapai 90 MW dengan kapasitas total 16500 MW.

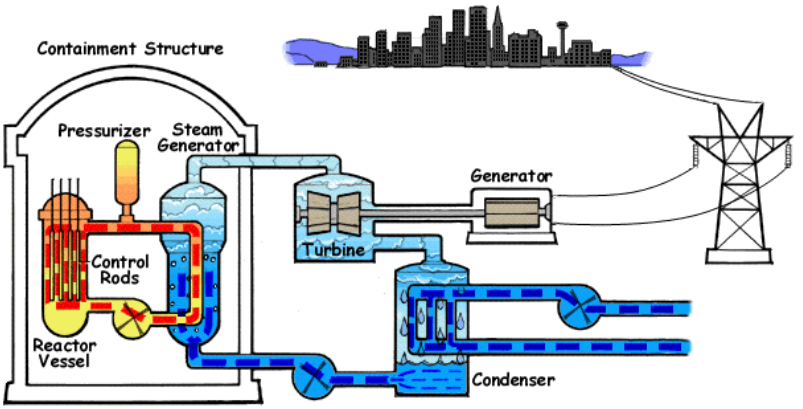
Pada tahun 1968, Badan Tenaga Atom Internasional mengeluarkan Non-Proliferation Treaty (NPT), yaitu kesepakatan untuk menghentikan penyebaran senjata nuklir (Gunawan & Andriana, 2019). Kesepakatan ini mewajibkan semua anggota PBB ikut serta dan tidak mengalihkan teknologi senjata nuklir ke negara lain, serta menjanjikan kemudahan bagi negara yang belum memiliki teknologi senjata nuklir untuk memperolehnya. Sebagai imbalannya, negara-negara yang memiliki senjata nuklir berjanji untuk mengurangi persediaannya demi perdamaian dunia yang bebas dari ancaman senjata nuklir. Pada saat NPT mulai berlaku, Indonesia turut menandatanganinya pada tahun 1970 dan meratifikasi pada tahun 1978 dengan alasan untuk berpartisipasi dalam memelihara perdamaian dunia, seperti yang tercantum dalam Pembukaan Undang-undang Dasar 1945 (Sipahutar, 2020).

Pada periode 1973-1974, terdapat beberapa peristiwa penting terkait masalah energi dunia dan nuklir. Di Amerika Serikat telah muncul kewajiban agar pengelola PLTN

memasang Emergency Core-Cooling System (ECCS) yang memungkinkan teras reaktor disemprot air apabila terjadi keadaan darurat dalam mencegah pelelehan untuk mengurangi efek adanya zat radioaktif hasil belahan proses reaksi berantai nuklir yang tersimpan dalam batang-batang bahan bakar (Mochizuki et al., 2012). ECCS berguna saat operasi PLTN terhenti dan pendinginan bahan bakar tidak dilakukan, maka ada risiko terjadinya pelelehan batang-batang bahan bakar nuklir. Oleh sebab itu, setiap PLTN harus memiliki pasokan listrik cadangan yang mandiri, minimal tiga sampai empat pembangkit diesel yang masing-masing dapat menyediakan listrik yang diperlukan. Tujuannya adalah untuk memastikan ketersediaan pasokan listrik yang mutlak diperlukan, mengingat kemungkinan adanya kerusakan pada pembangkit listrik dan kegagalan mesin dalam operasinya (Zubair et al., 2021).

Pada tahun 1973, terjadi krisis minyak karena harga internasional untuk komoditas ini meningkat tiga hingga empat kali lipat akibat embargo dari negara-negara Arab di Timur Tengah terhadap ekspor minyak ke Amerika Serikat (Mohan, 2015). Embargo ini dipicu oleh dukungan Amerika Serikat kepada Israel yang menyerang dan memasuki wilayah Palestina dan Jordan (Hamilton, 2013). Pada tahun 1974, terbit laporan No. WASH-1400 di Amerika Serikat berisi hasil Studi PRA-6 (*Probabilistic Risk Assessment*) yang dilakukan oleh tim Prof. Rasmussen dari Massachusetts Institute of Technology (MIT). Laporan tersebut menyimpulkan bahwa insiden nuklir yang paling mungkin terjadi adalah serangkaian kejadian seperti yang terjadi di PLTN Three Mile Island-2 pada tahun 1979, dengan peluang numerik sebesar 10-4/tahun. Namun,

peluang tersebut dapat dikurangi dengan memperbaiki keandalan peralatan dan komponen, sehingga peluang insiden nuklir menjadi lebih kecil, 10-6/tahun. Atas studi ini, Amerika Serikat lebih menggalakkan pembangunan PLTN demi ketahanan energi nasional.



Gambar 2.4 Diagram kerja sebuah pressurized water reactor untuk menghasilkan listrik. (Sumber: US Nuclear Regulatory Commission, 2007)

Dalam pengelolaan tenaga nuklir di Amerika Serikat dari tahun 1946 hingga 1974, Atomic Energy Commission (AEC) bertanggung jawab kepada Presiden. Joint Atomic Energy Commission yang terdiri dari DPR dan Senat bertanggung jawab dalam bidang legislatif (Phispal, 2013; Khairunnisa, 2017). Perusahaan swasta mulai diizinkan membangun instalasi nuklir pada tahun 1954 dengan pengawasan dari AEC. Pembangunan PLTN berkembang pada tahun 1960-an. Namun, tugas pengawasan menjadi terlalu berat bagi AEC sehingga pada tahun 1974 Kongres AS membubarkan AEC dan membentuk badan baru bernama Energy Research and Development Administration (ERDA). Pada tahun 1977, tugas

dan fungsi ERDA diserahkan kepada departemen energi yang baru dibentuk, sementara fungsi regulasi dan inspeksi atas kegiatan tenaga nuklir diberikan kepada komisi mandiri yang disebut Nuclear Regulatory Commission (NRC).

Pada tahun 1974, sebagai respons terhadap krisis minyak, Prancis mengumumkan bahwa mereka akan membangun PLTN jenis PWR sebagai sumber pasokan listrik masa depan, dan meninggalkan desain GCR. Pasokan bahan bakar PWR terjamin karena Prancis sudah memiliki pabrik pengayaan uranium dengan teknologi difusi gas untuk keperluan militer. Program pembangunan PLTN dilakukan bersamaan dengan program pengembangan industri nuklir. Dalam dua puluh tahun, Prancis berhasil menyelesaikan pembangunan 59 PLTN di beberapa lokasi, dan setiap tapak memiliki paling sedikit empat unit PLTN. Dengan duplikasi dan replikasi manufaktur komponen dan biaya konstruksi yang ditekan, Prancis berhasil memasok hampir 80 persen listriknya dengan tenaga nuklir. Prancis menjadi pengekspor tenaga listrik utama di Eropa saat ini (Mrozowska, 2014).

Pada tahun 1974, India melakukan percobaan ledakan nuklir dengan tujuan yang mungkin untuk memperkuat pertahanan negaranya. Namun, tindakan ini mengakibatkan pengetatan alih teknologi nuklir dari negara industri ke negara berkembang, serta penghentian alih teknologi nuklir ke India dan Pakistan yang bukan peserta NPT. Meski India menyatakan bahwa ledakan tersebut untuk tujuan damai, banyak yang menduga bahwa ada motif militer dan politik di baliknya (Rizani, 2017). Sampai saat ini, tidak terdapat bukti penggunaan ledakan nuklir untuk tujuan pertambangan bijih mineral di mana pun, termasuk di Amerika Serikat.

Percobaan ledakan nuklir India pada tahun 1974 mengakibatkan negara-negara nuklir memperketat alih teknologi nuklir. Untuk mengatasi hal ini, Nuclear Suppliers Group (NSG) dibentuk oleh negara industri dan menetapkan syarat-syarat bagi calon penerima alih teknologi. Persyaratan tersebut mencakup syarat politik dan ekonomi yang memperberat persyaratan kredit ekspor, bahkan memperpendek tenggang waktu pembayaran, jangka waktu angsuran, dan pelunasan pembayaran. Akibatnya, pembangunan PLTN di negara berkembang semakin terhambat. Pada tahun 1990, meski terjadi kecelakaan Chernobyl-4, kapasitas PLTN dunia meningkat menjadi lebih dari 300.000 MW dari kapasitas tahun 1980 (Cardis & Hatch, 2011; Schmid, 2015). Namun, pada awal tahun 1990-an, perkembangan teknologi menghasilkan pesaing berat bagi PLTN, yaitu teknologi *combined-cycle* yang memungkinkan turbin gas dan uap untuk memutar generator listrik. Dengan mengombinasikan dua jenis turbin, sistem dapat mencapai tingkat efisiensi termal yang tinggi yakni di atas 60%.

Teknologi nuklir dipastikan relatif murah serta dapat dibangun dalam waktu kurang dari tiga tahun, sehingga membuat para pemasok reaktor nuklir berusaha mengurangi biaya modal pembangunan PLTN dengan menyederhanakan desain, mengurangi jumlah komponen, pipa, dan volume bangunan (Králik, 2017). Mereka juga berusaha mempersingkat waktu konstruksi dan menerapkan standarisasi desain PLTN untuk memperoleh lisensi dengan cepat. Dalam rangka meningkatkan keselamatan dan kualitas produksi, sistem produksi komponen juga diawasi ketat. Akibatnya, risiko insiden PLTN telah berhasil diperkecil dari 10-4/tahun

menjadi sekitar 10-6/tahun. Setelah lama terhenti, terlihat tanda-tanda bahwa energi nuklir mulai mendapatkan perhatian lagi di Amerika Serikat dan Eropa sejak tahun 2000. Penurunan pembangunan PLTN disalahartikan oleh masyarakat sebagai akibat dari bahaya operasi reaktor nuklir, pengelolaan limbah radioaktif, dan mahalnya ongkos operasional (Wu et al., 2023). PLTN masih menjanjikan bagi investor atau perusahaan listrik sejak kenaikan harga minyak tahun 1979-1980 yang memicu pertumbuhan permintaan energi dan listrik dunia melandai.

PLTU-G yang menggunakan gas sebagai bahan bakar menjadi pilihan populer karena harganya yang lebih terjangkau dan waktu pembangunannya yang lebih singkat dibandingkan dengan PLTU-bb atau PLTN. Di Amerika Serikat, industri pertambangan batu bara bekerja sama dengan perusahaan kereta api khusus batu bara dan perusahaan listrik di wilayah timur untuk menjaga harga batu bara tetap terjangkau. Meski begitu, persaingan dari PLTU-G dan PLTU-bb mendorong para pemasok PLTN untuk mengembangkan desain yang lebih efisien dan terjangkau, seperti reaktor nuklir generasi ketiga dengan faktor keselamatan yang lebih baik dan konstruksi yang lebih cepat dan efektif.

Sebuah desain baru untuk reaktor PLTN mendapatkan nilai 'A' yang dirilis oleh beberapa perusahaan seperti GE-Toshiba (ABWR), Westinghouse-Mitsubishi (APWR), serta Siemens-KWU (EBWR). Investor percaya bahwa PLTN dapat dibangun dengan biaya yang lebih murah karena standarisasi dan peningkatan lain dalam desain reaktor. PLTN generasi ketiga telah selesai dibangun di Jepang (Kashiwazaki-6 dan Kashiwazaki-7) pada tahun 1996, keduanya terbukti tangguh

meski terkena gempa bumi berkekuatan 7,9 skala Richter pada September 2007. Studi kelayakan ekonomi untuk PLTN dimulai di Finlandia pada tahun 2000. Pada tahun 2003 diputuskan untuk membangun PLTN ke-4 di Olkuiloto dengan desain EBWR, serta pembangunan dimulai pada tahun 2005. Namun, di Amerika Serikat dan negara-negara Eropa lainnya, para investor masih khawatir bahwa proyek PLTN akan terhambat oleh protes atau tuntutan hukum lembaga swadaya masyarakat (LSM), yang dapat memperlambat konstruksi dan meningkatkan biaya modal. Hal ini menjadi penghambat utama investasi proyek PLTN baru di negara-negara industri saat ini (Kyne & Harris, 2015; Yang, 2018).

Pada sekitar tahun 2000, terjadi kesadaran bahwa dunia sulit untuk keluar dari ketergantungan pada energi fosil seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara. Kondisi ini mendorong beberapa pejabat dan petinggi lembaga internasional, termasuk Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) dan International Energy Agency (IEA) di Paris, untuk menyatakan bahwa pentingnya energi nuklir dalam upaya mengurangi dampak pemanasan global akibat emisi CO_2. Pernyataan ini dikeluarkan oleh Sekretaris Jenderal OECD dan Direktur Eksekutif IEA yang bertanggung jawab untuk melayani kepentingan negara industri. Namun, para politisi nampaknya mengabaikan himbauan tersebut. Di samping itu, gerakan lingkungan hidup belakangan ini mengalami perpecahan internal karena beberapa anggotanya sudah mengubah sikap mereka terhadap energi nuklir (Aras & Diaconeasa, 2021).

Gambar 2.5 PenTrawsfynydd sebagai salah satu inland nuclear power plant. (Sumber: Hefin Richards via Wikimedia, 2007)

4. ANEKA TIPE PLTN

PLTN memerlukan banyak air sebagai pendinginnya sehingga perlu lokasi yang sesuai. Sebagian besar PLTN dibangun di daerah pesisir atau yang lebih dikenal sebagai *coastal nuclear*. Selain itu, sejumlah PLTN dibangun di daratan jauh dari laut dengan memanfaatkan sumber air darat seperti sungai dan danau (Susiati et al., 2022a). Bila PLTN ditempatkan di dekat sumber air artinya PLTN tersebut menggunakan pendinginan langsung (*direct cooling*). PLTN terletak berdekatan dengan badan air yang besar, lalu air dialirkan melalui kondensor dan dibuang kembali. Selain itu, terdapat PLTN yang berlokasi jauh dari sumber air sehingga memanfaatkan pendinginan tidak langsung (*indirect cooling*). Prosesnya dilakukan dengan melewatkan uap melalui kondensor kemudian menggunakan menara pendingin. Ada

pula yang hanya mengandalkan udara dengan memanfaatkan pendinginan kering (*dry cooling*) (Yan et al., 2014).

a. *Inland Nuclear*

Beberapa negara memanfaatkan air darat seperti danau atau sungai sebagai pendingin reaktor. Terdapat kelemahan PLTN di darat, di antaranya rawan terhadap ancaman bencana gempa dan tsunami bagi sejumlah daerah. Maka, diperlukan penelitian yang cukup panjang agar memastikan daerah tersebut aman dari berbagai gangguan fisik maupun sosial. Beberapa negara seperti Tiongkok, Prancis, Spanyol, Hungaria, Swiss, Amerika Serikat, Kanada, dan Argentina mengembangkan PLTN di darat jauh dari laut.

b. *Coastal Nuclear*

Bila memperhatikan sebaran PLTN, mayoritas dibangun dekat dengan laut. PLTN yang didirikan di dekat laut memiliki banyak keunggulan sebab air laut dapat mencairkan dan menghilangkan panas buangan dengan lebih mudah. Sejauh ini, PLTN yang dibangun dekat laut relatif aman karena air tidak bersentuhan langsung dengan zat radioaktif. Hanya saja, ada hal yang perlu diperhatikan seperti sejumlah organisme yang tidak secara sengaja memasuki area ini atau ikan yang memiliki kemampuan berenang yang buruk dapat terganggu keberadaannya, sehingga sangat disarankan agar PLTN dibangun pada zona yang memiliki sedikit organisme laut.

Gambar 2.6 PLTN Torness di tepi pesisir Lothian, Britania Raya. (Sumber: Richard West via Wikimedia, 2014)

	Nuclear, business as usual	New model?
	ON LAND	OFFSHORE
Licensing	Site specific (ground and seismic requirements)	Standardized (site-independent design)
Construction	At site + lots of concrete (cost and delays)	In centralized shipyard + structural concrete is virtually eliminated
Ownership and Operations	Domestic utility owns and operates with domestically trained workforce	International utility could own and operate a worldwide fleet of plants, with crews that receive standardized training and operate in semi-monthly shifts (onboard living quarters)
Safety	Passive safety (new plants); evacuation possibly needed in case of severe accident	No loss of heat sink; no earthquake and tsunamis; superior defense in depth; no evacuation needed
Plant lifetime	60 years; all at one site	60 years; can track most profitable markets with minimal local infrastructure (plug-and-play)
Decommissioning	At site (decade-long project)	Immediate return to "green field"; Decommissioning in shipyard

Gambar 2.7 Perbandingan antara PLTN yang berlokasi di tepian pesisir dan daratan. (Sumber: IAEA, 2021)

c. *Floating Nuclea*r

Konsep nuklir terapung memiliki banyak keunggulan karena dibangun di galangan kapal sehingga dapat mengurangi biaya konstruksi dan dapat menghemat waktu pembangunan. Selain itu, penonaktifan dapat dilakukan dengan cepat dan hemat biaya di galangan kapal terpusat. Ekosistem dapat segera pulih (*green field*) setelah proses penonaktifan. PLTN diletakan antara 10 km hingga 20 km lepas pantai di perairan yang relatif dalam sehingga aman dari ancaman bencana gempa dan tsunami. Rusia merupakan negara pertama yang membangun PLTN terapung.

5. TEKNOLOGI PLTN

Teknologi nuklir dapat dilihat dari jenis reaktor atau generasi reaktor yang digunakan. Reaktor nuklir merupakan sebuah alat dan sistem yang digunakan untuk memproduksi isotop radioaktif (Malerba et al., 2022). Umumnya, reaktor digunakan untuk membangkitkan energi listrik tenaga nuklir. Alat ini digunakan untuk mengendalikan reaksi berantai baik reaksi fisi maupun fusi. Reaktor nuklir pertama kali dibuat oleh Enrico Fermi, seorang fisikawan keturunan Italia dan Amerika pada tahun 1942. Secara umum, reaktor nuklir dikelompokkan menjadi dua yaitu reaktor penelitian dan reaktor daya. Reaktor penelitian dirancang sebagai penghasil neutron yang dapat digunakan untuk pembuatan radionuklida dan analisis. Sedangkan reaktor daya dirancang untuk menghasilkan daya untuk menghasilkan listrik. Terdapat sejumlah komponen inti dalam reaktor nuklir sebagaimana uraian dari IAEA (2015b), yaitu:

a. *Nuclear fuel*, pada umumnya bahan bakar yang digunakan yaitu uranium dalam bentuk mineralnya yang berupa uranit, carnotite, dan pitchblende. Terdapat dua jenis utama atom uranium yang disebut isotop dengan 99,3% dari 238U dan uranium alami yang hanya 0,7% dari 235U. Selain itu, digunakan pula Thorium sebagai campurannya.

b. Moderator, alat ini diletakan dekat *nuclear fuel* yang berfungsi untuk mengurangi kecepatan neutron dan dengan kecepatan lambat akan menghasilkan reaksi fisi. Selain itu moderator berfungsi meningkatkan kecepatan proses reaksi fisi. Moderator yang paling umum adalah air yang disebut juga *light water* (H_2O). Jika hidrogen biasa diganti dengan isotop deuterium, senyawanya disebut *heavy water* (D_2O). Dibandingkan *light water*, jenis ini merupakan moderator yang lebih efisien karena hampir tidak menyerap neutron. Selain itu, grafit yang merupakan bentuk karbon juga dapat dijadikan sebagai moderator.

c. *Coolant*, perannya yaitu mendinginkan atau memindahkan panas dalam jumlah besar dari bahan bakar. Pada umumnya, pendingin dan moderator menggunakan zat yang sama. Selain itu, penggunaan gas CO_2 H_2O, D_2O, Na, dan He juga bisa digunakan untuk pendingin.

d. *Control rods*, alat ini digunakan dalam reaktor nuklir untuk mengontrol laju fisi bahan bakar nuklir. Bahan yang digunakan yaitu unsur-unsur kimia seperti boron, kadmium, perak, dan hafnium yang mampu menyerap banyak neutron tanpa membelah diri

e. *Reflector*, merupakan wilayah tanpa bahan bakar sekitar inti berfungsi menyebarkan neutron yang bocor, sehingga neutron dapat kembali ke inti.

f. *Shielding*, berfungsi untuk melindungi dari radiasi berbahaya yang dipancarkan oleh bahan radioaktif seperti uranium dan plutonium. Desain dinding pelindung harus memiliki ketebalan yang cukup untuk memenuhi standar keamanan.

Generasi reaktor nuklir untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dapat dibagi menjadi beberapa generasi, yaitu Generasi I hingga Generasi IV, dengan setiap generasi memiliki karakteristik dan teknologi yang berbeda (Pioro, 2022). Saat ini kebanyakan reaktor PLTN menggunakan generasi III dan III+. Generasi I dan II adalah jenis reaktor nuklir yang dikembangkan pada 1950-an hingga 1990-an. Generasi I terdiri dari reaktor eksperimental dan prototipe yang menggunakan teknologi awal, sedangkan Generasi II adalah jenis reaktor yang digunakan secara komersial pada saat ini. Kelemahan dari reaktor Generasi I dan II adalah bahwa mereka menghasilkan limbah radioaktif yang sangat berbahaya dan membutuhkan pengelolaan limbah yang sangat ketat dan kompleks. Sementara itu, generasi III dan III+ adalah jenis reaktor nuklir yang lebih canggih dan lebih aman daripada sebelumnya. Reaktor Generasi III dan III+ menggunakan desain yang lebih aman dan lebih efisien dalam penggunaan bahan bakar, serta menghasilkan limbah radioaktif yang lebih sedikit. Saat ini perkembangan reaktor nuklir telah memasuki generasi IV yang dikembangkan untuk mengatasi kelemahan dan risiko dari reaktor Generasi I hingga III+. Generasi IV memiliki potensi untuk menjadi lebih

efisien dalam penggunaan bahan bakar dan menghasilkan limbah radioaktif yang lebih sedikit (Goldberg & Rosner, 2011).

a. Reaktor Konvensional

Terdapat beberapa jenis reaktor nuklir yang umum digunakan saat ini oleh banyak negara di dunia, di antaranya:

1) Light Water Reactor (LWR)

LWR merupakan jenis reaktor nuklir yang menggunakan air sebagai pendingin dan moderator neutron. Reaktor LWR adalah salah satu jenis reaktor nuklir yang paling umum digunakan di seluruh dunia untuk menghasilkan energi listrik (Orr, 2015). Reaktor LWR dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan memanfaatkan reaksi fisi nuklir dalam bahan bakar nuklir, seperti Uranium-235 dan Plutonium-239. Dalam reaktor LWR, air digunakan sebagai pendingin untuk mengalirkan panas yang dihasilkan oleh reaksi fisi. Air juga berfungsi sebagai moderator neutron untuk memperlambat laju reaksi fisi. Reaktor LWR dapat dibedakan menjadi dua tipe utama: reaktor air bertekanan (PWR) dan reaktor air mendidih (BWR), tergantung pada cara air digunakan dalam proses pendinginan dan moderasi. Reaktor LWR memiliki beberapa keuntungan, seperti dapat menghasilkan energi listrik dengan biaya rendah dan memiliki emisi karbon yang sangat rendah, tetapi juga memiliki beberapa kekhawatiran terkait keselamatan dan pengelolaan limbah radioaktif (Sehgal, 2006).

a) Pressurized Water Reactor (PWR)

Reaktor ini merupakan salah satu jenis Light Water Reactor yang menghasilkan uap secara tidak langsung. Cara

kerjanya yaitu memompa air ke teras reaktor dengan tekanan tinggi untuk mencegah air mendidih. Air di inti dipanaskan oleh fisi nuklir dan kemudian dipompa ke dalam tabung di dalam penukar panas. Tabung tersebut memanaskan sumber air terpisah untuk menghasilkan uap yang kemudian memutar generator untuk menghasilkan listrik. Siklus ini berulang hingga air kembali ke reaktor untuk dipanaskan (IAEA, 2005). Keuntungan reaktor ini adalah saat panas meningkat, daya yang dihasilkan lebih sedikit sehingga mudah dioperasikan. Selain itu, sistem *loop* utama pada reaktor ini tidak mudah terkontaminasi oleh bahan radioaktif. Kekurangannnya reaktor ini memerlukan pipa dan bejana yang sangat kuat agar air bertekanan tinggi tetap dalam keadaan cair saat mempertahankan suhu tinggi, sehingga konstruksi PWR menjadi sangat mahal. Kelemahan lainnya yaitu proses pengisian bahan bakar kurang praktis karena harus menunggu beberapa bulan dan mudah korosif karena menggunakan asam borat.

b) Boiling Water Reactor (BWR)

Boiling Water Reactor (BWR) memiliki kesamaan sejarah dengan PWR yaitu pertama kali dikembangkan oleh United States Navy Nuclear Submarine Program sekitar tahun 1950. PLTN jenis BWR menggunakan air sebagai moderator dan pendingin. Sama seperti PLTN jenis PWR, perbedaannya terletak pada prosesnya yaitu air yang dipanaskan oleh inti reaktor langsung menguap dan kemudian digunakan untuk memutar turbin. PLTN jenis BWR tidak memerlukan penukar panas, sehingga strukturnya lebih sederhana dibandingkan dengan PLTN jenis PWR, terutama pada bagian sistem reaktor dan *containment system*. There is an innovation that was

created, namely the separator section and the internal steam dryer (Theriault, 2016). Kelebihan dari reaktor ini adalah air mendidih pada suhu bahan bakar nuklir yang lebih rendah daripada di Pressurized Water Reactor. Reaktor ini tidak menggunakan asam borat sehingga tidak mudah terjadi korosif pada bejana reaktor dan perpipaan. Salah satu kekurangannya yaitu untuk mengatur konsumsi bahan bakar nuklir, reaktor membutuhkan perhitungan yang lebih kompleks (Nuclear Energy Institute, 2022).

2) Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR)

PHWR menggunakan Deuterium Oksida (D_2O) sebagai moderator. Kelebihan reaktor ini yaitu memiliki sirkuit pendingin dan moderator yang terpisah berupa air ringan atau berat, sehingga suhu moderor menjadi lebih rendah dan stabil. Kunci utamanya yaitu penggunaan *heavy water* sebagai moderator yang artinya reaktor bisa menggunakan uranium alami tanpa harus menghabiskan banyak biaya untuk memperkaya unsur tersebut (World Nuclear Association, 2022). Namun, terdapat kekurangan dari reaktor ini yaitu jumlah uranium alami mengalami penurunan dan peningkatan laju pergerakan bahan bakar yang menyebabkan meningkatnya konsumsi per volume bahan bakar. Hal ini sangat berbeda dengan reaktor LWR yang menggunakan uranium yang diperkaya (Song et al., 2016). PLTN jenis PHWR menggunakan air berat sebagai moderator dan pendingin. Air berat memiliki massa molekul yang lebih besar daripada air biasa, sehingga mampu memperlambat neutron yang dilepaskan oleh reaksi fisi dan meningkatkan probabilitas reaksi fisi. PLTN jenis PHWR umumnya telah digunakan di

negara-negara yang memiliki sumber daya uranium yang melimpah, seperti Kanada dan India.

3) Gas Cooled Reactor (GCR)

GCR merupakan jenis reaktor nuklir yang menggunakan gas sebagai pendingin utama dalam sistem reaktor. GCR memiliki keunggulan dalam hal efisiensi termal dan keselamatan nuklir. GCR menggunakan gas-gas yang memiliki sifat yang sangat stabil dan tidak mudah terbakar, sehingga dapat menjaga keamanan dan stabilitas sistem reaktor (Bomboni et al., 2008). Bahan pendingin yang digunakan yaitu karbon dioksida atau helium dengan grafit sebagai moderator. Gas pendingin ini akan mengalir melalui inti reaktor untuk menyerap panas dari bahan bakar nuklir dan membuang panas tersebut keluar dari reaktor. Seperti HWR, moderator grafit menggunakan bahan bakar uranium alami. Kelebihan reaktor ini adalah sedikit kemungkinan terjadi korosi dan gas yang dihasilkan relatif lebih aman dan mudah ditangani. Gas pendingin tersebut juga tidak membutuhkan tekanan tinggi untuk menjaga kestabilan sistem, sehingga membuat sistem ini lebih mudah dan murah dalam hal pemeliharaan dan pengoperasian. Kekurangannya yakni memerlukan penukar panas yang besar sebab gas memiliki koefisien perpindahan panas yang lebih rendah dan bahan bakar harus dioperasikan pada suhu tinggi (Beck & Pincock, 2011). GCR umumnya digunakan untuk menghasilkan listrik dalam skala besar dan telah digunakan di beberapa negara seperti Inggris, Jerman, dan Prancis.

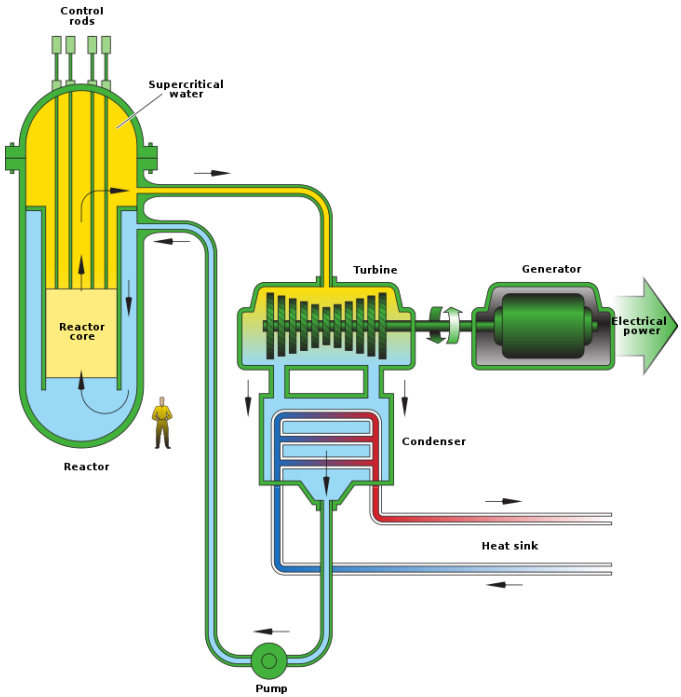
4) Light Water Graphite Reactor (LWGR)

LWGR pertama kali didesain oleh Uni Soviet yang saat ini paling banyak dioperasikan di Rusia serta negara-negara yang dahulu tergabung dalam Pakta Warsawa. Jenis reaktor nuklir ini menggunakan air biasa (H2O) sebagai pendingin dan moderator, serta grafit sebagai bahan penyerap neutron. Tipe *vessel* yang digunakan yaitu *tube* dengan moderator grafit berbahan bakar Uranium Dioksida (UO_2). Keunggulan reaktor ini yakni tingkat pengayaan bahan bakar yang rendah dan dapat mengganti tabung bahan bakar selama operasi reaktor hingga lima kali penggantian dalam sehari. Hal ini tidak berlaku untuk mayoritas tipe PWR. Kelemahannya yakni reaktor ini cukup berbahaya karena suhu grafit pada moderator sangat tinggi (Schulenberg & Starflinger, 2014). Insiden terkenal yang terjadi pada LWGR meliputi kecelakaan Chernobyl pada tahun 1986 di Ukraina, yaitu salah satu dari empat reaktor di pembangkit listrik nuklir Chernobyl meledak dan mengakibatkan dampak radiasi yang besar. Karena insiden ini, banyak negara yang kemudian memutuskan untuk tidak menggunakan LWGR dalam program energi nuklir mereka.

b. Reaktor Canggih

Reaktor canggih didesain untuk meningkatkan produksi energi, efisiensi biaya, keselamatan, keamanan, dan pengelolaan limbah untuk mengurangi pencemaran terhadap lingkungan dengan menggabungkan teknologi dan bahan baru serta yang sudah ada dari reaktor sebelumnya. Fitur keselamatan bawaan atau pasif, desain sederhana atau

modular, kemampuan mengikuti beban, stabilitas kimia dan fisik yang tinggi, spektrum neutron cepat dan siklus bahan bakar tertutup juga diintegrasikan dalam desain ini (Arostegui & Holt, 2019). Reaktor canggih ini dikembangkan menjadi tiga jenis yaitu 1) Advanced Water-cooled Reactor dengan ukuran yang lebih kecil dan peningkatan efisiensi, 2) Non-water-cooled Reactor yang menggunakan bahan seperti logam cair seperti natrium dan timbal, gas seperti helium dan karbon dioksida, atau garam cair sebagai pendingin, serta 3) Fusion Reactor yang menghasilkan energi dengan cara berbeda dari reaktor fisi yaitu dengan menggabungkan inti atom kecil. Di bawah ini merupakan beberapa jenis reaktor canggih yang belum digunakan dalam skala luas, antara lain:



Gambar 2.8 Desain SCWRs (Sumber: US Department of Energy Nuclear Energy Research Advisory Committee, 2019)

1) Supercritical Water-Cooled Reactor (SCWR)

SCWR merupakan reaktor suhu tinggi, bertekanan tinggi, dan berpendingin air ringan. Reaktor ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan reaktor lainnya yakni SCWR memiliki efisiensi termal yang baik dan tidak memerlukan pompa pendingin. Reaktor ini mampu menghemat bahan bakar dan mengurangi sisa panas (Cai et al, 2014). SCWR merupakan jenis reaktor nuklir generasi keempat yang menggunakan air di bawah kondisi superkritikal sebagai pendingin dan bahan bakar nuklirnya. Air superkritikal adalah kondisi ketika air memiliki suhu dan tekanan di atas titik kritisnya sehingga memiliki sifat fisika dan kimia yang unik. Dalam kondisi superkritikal, air dapat menghilangkan efek pendinginan di sekitar elemen bahan bakar dan menghasilkan daya yang lebih besar. SCWR menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan dengan reaktor nuklir konvensional, seperti efisiensi termal yang lebih tinggi, produksi limbah nuklir yang lebih rendah, dan kemampuan untuk menggunakan bahan bakar yang lebih murah dan tersedia secara luas. Namun, karena teknologi ini masih dalam tahap pengembangan, terdapat banyak tantangan yang harus diatasi sebelum SCWR dapat menjadi pilihan yang layak untuk pembangkit listrik nuklir komersial.

2) Gas-cooled Fast Reactor (GFR)

GFR merupakan reaktor berpendingin helium, bersuhu tinggi, dan siklus bahan bakar tertutup. Reaktor terpilih ini telah memenuhi syarat utama dalam generasi IV yaitu aspek keberlanjutan. Reaktor ini mampu mengurangi kuantitas dan radiotoksisitas limbah radioaktif. Selain itu, dengan GFR

tujuan nonproliferasi dapat terealisasi sebab teknologi yang digunakan mampu meminimalisir transportasi bahan bakar. Selain itu, GFR dirancang agar lebih menjamin keselamatan dan keamanan lingkungan (Stainsby et al, 2009). PLTN jenis ini mampu menghasilkan suhu yang lebih tinggi daripada PLTN jenis lainnya, sehingga dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen dan bahan bakar lainnya yang memerlukan suhu tinggi (IAEA, 2018). PLTN jenis HTGR juga lebih aman karena bahan bakar nuklirnya terkandung dalam bola kecil yang kuat dan tahan terhadap kecelakaan.

3) Lead-cooled Fast Reactor (LFR)

LFR merupakan reaktor dengan bahan bakar timbal cair, spektrum cepat, mampu beroperasi pada suhu tinggi mendekati tekanan atmosfer, titik didih pendingin mencapai 1743° C, dan tekanan uap yang rendah. Kelebihannya yaitu LFR mampu menjamin tingkat keselamatan yang tinggi, penyederhanaan operasi, dan menguntungkan bila ditinjau secara ekonomis (Smith & Cinotti, 2016). Seperti namanya, reaktor ini dirancang untuk beroperasi pada kecepatan neutron cepat, yang memungkinkan konversi isotop uranium yang tidak stabil menjadi bahan bakar nuklir yang dapat digunakan. LFR memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan jenis reaktor nuklir lainnya, seperti tingkat keselamatan yang lebih tinggi, efisiensi termal yang lebih baik, dan kemampuan untuk menggunakan bahan bakar yang lebih melimpah dan lebih murah. Selain itu, LFR dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan efisiensi yang lebih tinggi daripada jenis reaktor nuklir konvensional lainnya.

4) Molten Salt Reactor (MSR)

MSR dikenal sebagai jenis reaktor nuklir yang menggunakan garam cair sebagai bahan bakar dan pendinginnya. Garam yang digunakan biasanya berupa campuran fluorida dan klorida dengan unsur-unsur seperti thorium, uranium, atau plutonium yang larut di dalamnya. Dalam MSR, garam cair tersebut berfungsi sebagai medium pendingin dan juga sebagai medium transpor bahan bakar, yang memungkinkan reaktor untuk menghasilkan energi listrik tanpa harus mematikan reaktor untuk mengganti bahan bakarnya (Serp et al., 2014). MSR merupakan reaktor yang tidak memerlukan bahan bakar padat dan mampu beradaptasi dengan berbagai siklus nuklir sehingga bahan bakar yang digunakan menjadi beragam. MSR beroperasi pada suhu yang lebih tinggi menyebabkan peningkatan efisiensi dalam menghasilkan energi listrik. Selain itu, keamanan reaktor terjamin sebab tekanan operasi yang rendah dapat mengurangi risiko kerusakan parah dan kehilangan pendingin.

5) Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)

SFR menggunakan natrium cair sebagai pendingin reaktor dengan lingkungan yang didesain bebas oksigen untuk terjadinya korosi. Reaktor ini mampu mengurangi radiotoksisitas dan panas serta dilengkapi dengan pembuangan limbah. Selain itu, optimasi pemanfaatan sumber daya uranium dengan mengelola bahan bakar fosil secara efektif dan menggunakan sistem daur ulang yang efisien. SFR menghasilkan energi listrik dengan lebih efisien daripada PLTN jenis lainnya karena natrium memiliki konduktivitas panas yang tinggi dan mampu mengambil

energi panas dengan lebih efektif (Aoto et al., 2014). Namun, penggunaan natrium sebagai pendingin dan moderator juga memerlukan sistem pengamanan yang canggih dan ketat karena sifatnya yang sangat reaktif terhadap air dan oksigen.

6) Very High Temperature Reactor (VHTR)

VHTR merupakan reaktor spektrum neutron termal berpendingin helium, moderator grafit, dengan suhu yang dihasilkan antara 700-1000 °C. VHTR memiliki perangkat keselamatan bawaan yang baik, efisiensi termal yang baik, biaya operasi dan pemeliharaan yang rendah, serta dilengkapi dengan modular. Salah satu keunggulan VHTR adalah kemampuannya untuk menghasilkan suhu yang sangat tinggi, sehingga dapat dimanfaatkan untuk aplikasi industri yang memerlukan suhu tinggi seperti produksi hidrogen dan pembakaran bahan bakar fosil (Fütterer et al., 2014). Selain itu, bahan bakar bola grafit pada VHTR memiliki sifat yang stabil dan tahan terhadap kerusakan yang akan mengurangi risiko kecelakaan nuklir. Reaktor ini bisa memproses transformasi kimia, misalnya produksi hidrogen. Pengembangan VHTR masih dalam tahap penelitian dan pengembangan, dan belum sepenuhnya siap untuk diimplementasikan dalam skala komersial.

7) Small Modular Reactor (SMR)

SMR merupakan reaktor yang lebih flexible dan berukuran kecil. Teknologi ini sangat cocok untuk aplikasi tenaga nuklir non-listrik seperti desalinasi, produksi hidrogen, pemanasan dan pendinginan prumahan serta beberapa aplikasi industri lainnya (IAEA, 2020). Jenis ini lebih kecil dari

PLTN konvensional yang biasa digunakan saat ini. SMR biasanya memiliki kapasitas produksi energi listrik antara 1 hingga 300 megawatt thermal (MWt), sedangkan PLTN konvensional dapat memiliki kapasitas produksi energi listrik hingga beberapa keuntungan utama dari SMR adalah ukurannya yang lebih kecil, sehingga dapat dipasang di lokasi yang lebih fleksibel dan dekat dengan sumber kebutuhan energi listrik (Vujić et al., 2012). Selain itu, SMR dapat dibangun dan dioperasikan dengan biaya lebih rendah dibandingkan dengan PLTN konvensional karena ukurannya yang lebih kecil memungkinkan penghematan dalam desain, bahan, tenaga kerja, dan biaya infrastruktur. SMR dapat digunakan sebagai sumber energi listrik yang terpisah, atau sebagai bagian dari jaringan energi listrik yang lebih besar. SMR juga dapat digunakan sebagai sumber energi untuk aplikasi industri, seperti produksi hidrogen, pengolahan minyak, dan proses kimia lainnya. SMR masih dalam tahap pengembangan dan pengujian beberapa negara seperti Amerika Serikat, Kanada, Inggris, dan Rusia.

8) Fast Breeder Reactor (FBR)

FBR merupakan jenis reaktor nuklir yang dirancang untuk memproduksi lebih banyak bahan bakar nuklir daripada yang dikonsumsi, melalui proses fisi nuklir dan pembelahan inti (Puthiyavinayagam et al., 2017). FBR menggunakan neutron cepat untuk memecah inti atom dan menghasilkan lebih banyak bahan bakar daripada yang dikonsumsi. FBR juga dapat memanfaatkan limbah nuklir yang dihasilkan oleh reaktor konvensional sebagai bahan bakar, sehingga mengurangi masalah limbah nuklir. Berbeda dengan tipe

lainnya, FBR tidak memiliki moderator. Bahan bakar yang digunakan yaitu campuran antara oksida plutonium dan uranium. Logam cair seperti sodium digunakan sebagai pendingin pada tekanan rendah. Kelebihan reaktor ini adalah segi keamanan lebih terjamin, panas yang dihasilkan pada permukaan relatif kecil, dan mudah dikontrol. Namun, FBR juga memiliki beberapa kelemahan, seperti biaya yang tinggi, kesulitan dalam memperbaiki masalah keselamatan, dan risiko proliferasi nuklir.

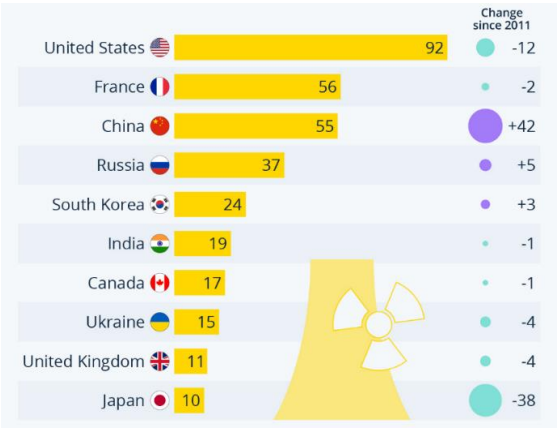
LPLHNU
LEMBAGA PELESTARIAN LINGKUNGAN HIDUP
NAHDLOTUL 'ULAMA

BAB_3

PEMANFAATAN NUKLIR SEBAGAI ENERGI HIJAU

1. BELAJAR DARI NEGARA LAIN

Energi nuklir merupakan salah satu alternatif vital untuk memenuhi kebutuhan energi dalam pembangunan suatu negara. Bagi negara yang ingin mencapai kemajuan, kekuatan, dan kesejahteraan, energi nuklir dapat menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan dunia pada bahan bakar fosil yang kian menipis (Rhodes, 2018). Saat ini, sekitar setengah dari kebutuhan energi dunia dipenuhi oleh bahan bakar minyak, diikuti oleh batu bara dan gas. Sumber energi lainnya hanya menyumbang sejumlah kecil kebutuhan energi listrik dunia. Oleh sebab itu, banyak negara sejak abad ke-20 berlomba-lomba untuk mengembangkan energi nuklir. Pengalaman negara-negara di dunia terhadap nuklir sangat bervariasi. Beberapa negara memiliki program nuklir yang berkembang dengan pesat dan berhasil menciptakan banyak PLTN yang andal, sementara negara lain mengalami kegagalan dalam pengembangan teknologi nuklir dan mengalami bencana nuklir yang parah (Kingston, 2012). Perkembangan pemanfaatan tenaga nuklir oleh berbagai negara di dunia yakni sebagai berikut.



Gambar 3.1 *Negara yang mengoperasikan reaktor nuklir.* (Sumber: World Nuclear Industry Status Report via Statista, 2022)

a. Amerika Serikat

Pada tanggal 6 Desember 1941, pemerintahan Amerika Serikat memutuskan untuk memulai proyek pembuatan bom atom yang kemudian diberi nama Proyek Manhattan di bawah pimpinan Robert Oppenheimer (Reed, 2014). Proyek ini membutuhkan waktu empat tahun untuk mengembangkan senjata nuklir pertama yang diuji pada 16 Juli 1945 di Alamogordo, New Mexico, Amerika Serikat. Proyek Manhattan merupakan upaya untuk mengembangkan senjata nuklir oleh Amerika Serikat yang dibantu oleh Britania Raya dan Kanada. Proyek ini melibatkan lebih dari 30 tempat riset dan produksi yang berbeda. Pengembangan nuklir untuk senjata ini lebih banyak dikembangkan untuk tujuan damai.

Gambar 3.2 Sebaran reaktor nuklir untuk keperluan komersial di Amerika Serikat. (Sumber: US Nuclear Regulatory Commission via NRDC, 2022)

Pengembangan energi ini di Amerika Serikat menghasilkan PLTN dalam skala masif. Pada saat ini, Amerika Serikat memiliki 93 PLTN yang beroperasi di seluruh negara, yang

menghasilkan sekitar 20% dari total pasokan listrik nasional. PLTN di Amerika Serikat digunakan sebagai sumber energi bersih dan andal, serta memberikan kontribusi besar dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Namun, terdapat beberapa insiden di PLTN Amerika Serikat, meskitidak seberat insiden di negara lain seperti Chernobyl. Salah satu insiden terbesar terjadi di Three Mile Island, Pennsylvania pada tahun 1979, yaitu ketika terjadi kegagalan pada sistem pendingin reaktor menyebabkan ledakan dan kebocoran bahan radioaktif. Insiden ini merupakan bencana nuklir terbesar yang pernah terjadi di Amerika Serikat, meski tidak menimbulkan korban jiwa. Sejak insiden di Three Mile Island, Amerika Serikat telah memperketat aturan keselamatan nuklir dan meningkatkan keamanan di PLTN (Walker, 2004). Selain itu, PLTN di Amerika Serikat juga telah dirancang untuk memiliki sistem pendingin darurat dan sistem lainnya untuk mencegah terjadinya insiden serupa.

b. Uni Soviet (Rusia)

Uni Soviet (kini Rusia) memiliki sejarah panjang dalam pengembangan teknologi nuklir dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Awal pengembangan nuklir terjadi pada tahun 1939. Ilmuwan Uni Soviet, Yakov Zel'dovich dan Yulii Khariton, mengusulkan pembuatan bom atom. Setelah mendengar berita tentang bom atom yang dijatuhkan di Jepang pada akhir Perang Dunia II, Stalin menginstruksikan para ilmuwan Soviet untuk memulai program nuklir pada Agustus 1945 (Cochran, 2019). Program nuklir Soviet dimulai pada tahun 1945 dan dipimpin oleh Igor Kurchatov. Program ini memiliki fokus pada pengembangan senjata nuklir. Pada

tahun 1949, Uni Soviet melakukan uji coba senjata nuklir pertamanya. Uni Soviet memulai pembangunan PLTN pertama di dunia pada tahun 1954. PLTN Obninsk beroperasi dari tahun 1954 hingga 2002 dan menghasilkan 5 megawatt listrik. Pada tahun 1961, Uni Soviet melakukan uji coba senjata nuklir terbesar yang pernah ada, Tsar Bomba. Bom tersebut memiliki daya ledak sebesar 50 megaton. Meski dikurangi daya ledaknya dari 100 megaton, tetap menjadi ledakan senjata nuklir terkuat yang pernah dilakukan oleh manusia.

Gambar 3.3 Sebaran fasilitas nuklir di Rusia.
(Sumber: US Government Accountability Office, 2020)

Pada tahun 1986, PLTN Chernobyl di Ukraina (dahulu bagian dari Uni Soviet) mengalami kecelakaan nuklir yang mengakibatkan bencana nuklir yang sangat besar dan dampak yang merusak. Kecelakaan ini menjadi salah satu kecelakaan nuklir paling parah dalam sejarah. Meski begitu, Uni Soviet (sekarang Rusia sebagai pewaris kejayaannya) pernah membangun PLTN terbesar di dunia yang masih beroperasi hingga saat ini, yakni PLTN Kashiwazaki-Kariwa di Jepang memiliki kapasitas 7,96 gigawatt (Gatti et al., 2018; Ichihara et al., 2021). Rusia terus mengembangkan teknologi nuklir dan memperkenalkan reaktor nuklir generasi baru, termasuk

reaktor nuklir kecil yang dapat diangkut dan reaktor nuklir berpendingin gas.

c. Britania Raya (Inggris)

Pada tahun 1952, Britania Raya melaksanakan percobaan senjata nuklir perdana bernama "Hurricane" yang sebagian besar datanya diperoleh dari kerja sama dengan Amerika Serikat dalam Proyek Manhattan. Tujuan utamanya adalah untuk dapat melawan Uni Soviet secara mandiri. Kemudian pada tahun 1957, Britania Raya melakukan uji coba bom hidrogen. Selain itu, Britania Raya juga mempertahankan beberapa armada kapal selam yang dilengkapi dengan senjata nuklir. Dari pengembangan senjata ini melahirkan ide untuk menggunakan nuklir sebagai pembangkit listrik. Pada tahun 1956, dibangunlah PLTN Calder Hall sebagai PLTN perdana di dunia yang dapat menghasilkan listrik secara komersial. Selanjutnya, Britania Raya membangun sejumlah PLTN di berbagai lokasi, termasuk di Sellafield, Hinkley Point, dan Hartlepool (Kelleher et al., 2012). Pada puncaknya, Britania Raya memiliki sekitar 26 PLTN yang beroperasi di seluruh negeri. Namun, saat ini mayoritas PLTN Britania Raya sudah mencapai masa pensiunnya dan tidak beroperasi lagi. Britania Raya saat ini sedang mempertimbangkan untuk membangun PLTN baru guna mengurangi emisi karbon dan meningkatkan pasokan listrik yang berkelanjutan.

d. Prancis

Prancis menguji coba senjata nuklirnya pertama kali pada 1960, serta bom hidrogen pada 1968. Prancis juga memiliki banyak PLTN yang andal dan aman, dan menjadi salah satu

negara dengan persentase energi nuklir terbesar di dunia (Zimmermann & Keles, 2023). Meski demikian, terdapat beberapa kejadian kebocoran dan insiden di PLTN Prancis. Negara ini sangat bergantung pada energi nuklir, yaitu sekitar 70% pasokan listrik negara berasal dari PLTN. Sejak awal tahun 1960-an, Prancis telah membangun sekitar 56 reaktor nuklir yang tersebar di seluruh negeri. Namun, dalam beberapa tahun terakhir, terjadi penurunan dalam penggunaan energi nuklir di Prancis. Pemerintah Prancis telah mengumumkan rencana untuk mengurangi ketergantungan negara pada energi nuklir dan meningkatkan penggunaan sumber energi terbarukan. Pada tahun 2020, pemerintah Prancis memperkirakan akan menutup 14 reaktor nuklir dalam jangka panjang, dan mengurangi kontribusi PLTN pada pasokan listrik negara menjadi 50% pada tahun 2035.

Gambar 3.4 Lokasi PLTN di Perancis.
(Sumber: Sting et al. via Wikimedia, 2016)

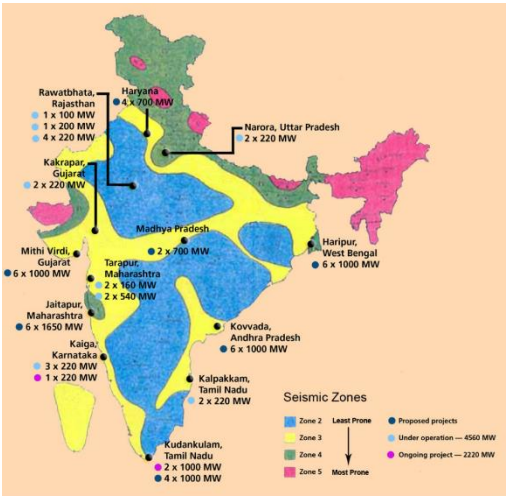
e. Republik Rakyat Tiongkok (China)

Pada tahun 1964, Republik Rakyat Tiongkok menguji coba senjata nuklirnya untuk pertama kalinya yang mengejutkan banyak agen intelijen barat. Meski Tiongkok mendapatkan pengetahuan nuklir dari Uni Soviet, mereka menghentikan kerja sama setelah perpecahan Sino-Soviet. Pada tahun 1967, Tiongkok juga melakukan uji coba bom hidrogen pertamanya di Lop Nur. Diperkirakan bahwa Tiongkok memiliki sekitar 130 hulu ledak nuklir. Demi kepentingan sipil, Tiongkok telah mengembangkan program energi nuklir yang pesat dalam beberapa dekade terakhir dan telah membangun beberapa PLTN (Xiao et al., 2017). Saat ini, Tiongkok memiliki 50 PLTN yang beroperasi dengan kapasitas total sekitar 51 gigawatt (GW), dan sedang membangun 18 PLTN tambahan dengan kapasitas total 21 GW. Selain itu, Tiongkok juga memiliki rencana ambisius untuk membangun lebih banyak PLTN di masa depan. Program energi nuklir Tiongkok didorong oleh kebutuhan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan emisi gas rumah kaca.

Gambar 3.5 Sebaran PLTN di Tiongkok, sebagian besar berada pada wilayah pesisir. (Sumber: World Nuclear Association, 2023)

f. India

India tidak pernah menandatangani Perjanjian Nonproliferasi Nuklir. Pada tahun 1974, India melakukan pengujian senjata nuklir "Smiling Buddha", tepat setelah NPT dibentuk dan menjadi perhatian baru tentang cara teknologi nuklir sipil dapat dimanfaatkan untuk tujuan militer. Alasan utama di balik pengujian ini diduga untuk menghadapi Tiongkok. Pada tahun 1998, India melakukan pengujian termonuklir dalam "Operasi Shakti" (meski keberhasilan termonuklir ini masih diragukan). Pada Juli 2005, Amerika Serikat secara resmi mengakui India sebagai "negara dengan teknologi nuklir maju yang bertanggung jawab" dan setuju untuk melakukan kerja sama nuklir. Dalam bidang energi nuklir untuk kepentingan sipil, Nuclear Power Corporation of India Limited (NPCIL) bertanggung jawab atas empat PLTN, yaitu Tarapur Atomic Power Station, Kudankulam Nuclear Power Plant, Kaiga Atomic Power Station, dan Kakrapar Atomic Power Station (Chaki, 2014). Selain itu, India juga sedang membangun beberapa PLTN lain yang akan segera beroperasi di masa depan.



Gambar 3.6 Sebaran PLTN di India berdasarkan zonasi bahaya gempa bumi. (Sumber: DownToEarth, 2011)

g. Pakistan

Pakistan, yang bukan merupakan anggota Perjanjian Nonproliferasi Nuklir, telah secara rahasia mengembangkan senjata nuklir selama beberapa dekade, dimulai pada akhir 1970-an. Pakistan menjadi negara nuklir setelah membangun reaktor nuklir pertamanya dekat Karachi pada awal 1970-an dengan peralatan dan bahan dari negara-negara barat. Setelah uji coba senjata nuklir India, Pakistan secara bertahap memulai program pengembangan senjata nuklir dan membangun fasilitas nuklirnya, kebanyakan berada di bawah tanah dekat ibu kota Islamabad. Selain memiliki beberapa PLTN untuk keperluan sipil, Pakistan sedang membangun beberapa pembangkit baru. Namun, program nuklir Pakistan telah menjadi sumber konflik antara Pakistan dan India, serta menjadi isu keamanan global dan nonproliferasi nuklir yang kontroversial (Ganguly & Kapur, 2010).

h. Korea Utara

Pada tahun 2006, 2009, 2013, 2016, dan 2017, Korea Utara telah melakukan uji coba nuklir, meski negara ini telah menyetujui beberapa kesepakatan internasional untuk menghentikan program nuklirnya (NPT dan CTBT). Namun, mereka telah melanggar kesepakatan ini dan terus memperkuat program nuklir mereka. Para pakar intelijen mempercayai bahwa sebuah uji coba nuklir telah dilangsungkan seiring dengan ditemukannya isotop radioaktif oleh angkatan udara Amerika Serikat (USAF). Akan tetapi, kebanyakan pejabat setuju bahwa uji coba tersebut kemungkinan hanya mengalami sedikit keberhasilan dikarenakan daya ledaknya yang hanya berkisar kurang dari

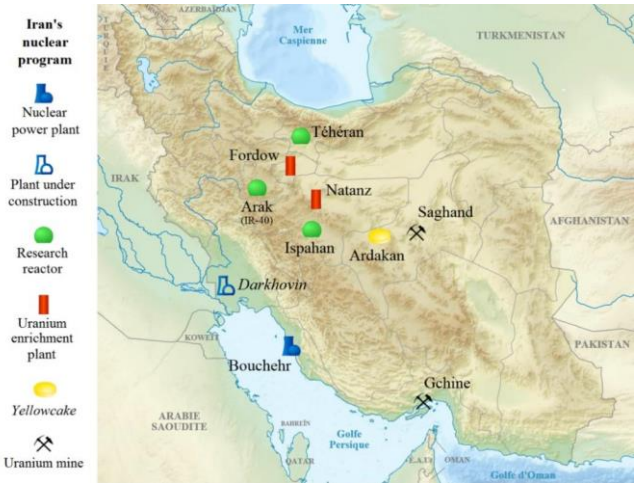
1 kiloton. Untuk penggunaan sipil, tidak ada informasi yang dapat dipastikan secara akurat mengenai adanya PLTN di Korea Utara. Namun, pemerintah Korea Utara telah secara terbuka mengumumkan bahwa mereka memiliki program nuklir dan telah melakukan serangkaian uji coba senjata nuklir yang menimbulkan kekhawatiran di kalangan masyarakat internasional (Clemens, 2010).

i. Israel

Israel tidak menjadi anggota NPT dan menolak untuk mengakui atau membantah keberadaan senjata nuklir. Walaupun Israel mengklaim bahwa Pusat Riset Nuklir Negev adalah "reaktor penelitian", tetapi belum ada hasil riset yang diterbitkan oleh ilmuwan yang bekerja di sana. Informasi tentang program di Dimona diungkap oleh Mordechai Vanunu pada 1986, yaitu analisis gambar mengidentifikasi bunker senjata, peluncur misil bergerak, dan situs peluncuran pada foto satelit. IAEA percaya bahwa Israel memiliki senjata nuklir dan mungkin telah melakukan uji coba senjata nuklir dengan Afrika Selatan pada 1979, tetapi hal ini belum dikonfirmasi. Israel diduga memiliki antara 75 hingga 200 senjata nuklir. Negara ini terkonfirmasi memiliki PLTN Nahal Sorek di Israel tengah untuk riset dan pembangkit listrik dengan kapasitas 5 MW. PLTN ini hanya menghasilkan 2 persen dari total produksi listrik Israel. Israel sedang mempertimbangkan pembangunan PLTN baru di daerah Shomron, tetapi rencana ini masih dalam tahap diskusi dan belum disetujui (Yaar et al., 2016).

j. Iran

Iran sebetulnya menandatangani NPT dan telah menyatakan ketertarikannya dalam teknologi nuklir, termasuk pengayaan nuklir untuk tujuan damai. Namun, CIA dan beberapa negara Barat telah mencurigai bahwa tujuannya sebenarnya adalah untuk mengembangkan senjata nuklir dan menganggap bahwa Iran tidak terlalu membutuhkan tenaga nuklir. Meski mantan menteri luar negeri Iran, Kamal Kharrazi, secara tegas menyatakan ambisi negaranya dalam teknologi nuklir, hal ini memicu IAEA untuk melaporkan Iran ke Dewan Keamanan PBB pada tanggal 4 Februari 2006 karena kekhawatiran negara-negara barat terhadap program nuklir Iran. Saat ini, Iran memiliki satu PLTN yang beroperasi secara komersial, yaitu PLTN Bushehr di sepanjang pantai Teluk Persia (Nasouri & Delgarm, 2022). PLTN Bushehr telah beroperasi secara komersial sejak September 2011 setelah beberapa penundaan dalam pembangunan. Selain itu, Iran juga memiliki reaktor riset di Tehran yang digunakan untuk riset dan pengembangan teknologi nuklir. Iran juga sedang membangun reaktor air berat di Arak yang saat ini sedang dalam tahap pembangunan. Meski Iran mengklaim bahwa reaktor Arak untuk tujuan medis dan industri, beberapa negara percaya bahwa reaktor tersebut dapat menghasilkan plutonium yang dapat digunakan untuk senjata nuklir (Pourimani & Davoodmaghami, 2018).



Gambar 3.7 Instalasi nuklir di Iran.
(Sumber: Yagasi & Sémhur via Wikimedia, 2012)

k. Arab Saudi

Pada tahun 2003, pejabat pemerintah Saudi Arabia mengindikasikan bahwa mereka dipaksa untuk mempertimbangkan program senjata nuklir karena hubungan yang memburuk dengan Amerika Serikat, meski sejak itu mereka telah menyangkal adanya program tersebut. Pada bulan Maret 2006, majalah Jerman Cicero melaporkan bahwa Saudi Arabia telah menerima bantuan dari Pakistan sejak 2003 untuk mengembangkan rudal nuklir. Namun, pihak Pakistan membantah bahwa mereka memberikan bantuan untuk program nuklir Saudi Arabia. Saat ini, Saudi Arabia belum memiliki PLTN yang beroperasi secara komersial. Namun, Saudi Arabia memiliki rencana untuk membangun hingga 16 PLTN dalam beberapa dekade ke depan. Tujuan dari rencana ini adalah memenuhi permintaan energi listrik yang semakin meningkat di negara tersebut dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Pada tahun 2018, Saudi Arabia

menandatangani perjanjian kerja sama nuklir dengan Rusia untuk membangun dua unit PLTN di negara tersebut (Nakhle, 2018). Selain itu, Saudi Arabia juga menjalin kerja sama dengan negara-negara lain seperti Tiongkok, Prancis, Korea Selatan, dan Amerika Serikat untuk membangun PLTN di masa depan.

l. Kanada

Kanada memiliki kemampuan untuk mengembangkan teknologi nuklir, memiliki cadangan uranium yang besar, dan memasarkan reaktor untuk tujuan sipil (Zablotska et al., 2014). Kanada juga memiliki persediaan plutonium yang signifikan dan dihasilkan oleh reaktor PLTN. Meski Kanada memiliki kemampuan untuk mengembangkan senjata nuklir dalam waktu singkat, mereka sebenarnya telah memiliki program tersebut sejak tahun 1945. Kanada telah menjadi kontributor penting dalam hal pengetahuan dan bahan baku untuk program nuklir Amerika di masa lalu, dan turut serta dalam Proyek Manhattan. Sekitar 15 persen dari total produksi listrik di Kanada berasal dari PLTN dengan pembangkit listrik Darlington di Ontario adalah yang terbesar dengan empat reaktor PWR berkapasitas 3.512 megawatt, serta pembangkit listrik Bruce di Ontario menjadi yang terbesar kedua di dunia dengan total kapasitas 6.400 MW. Meski penggunaan energi nuklir masih menjadi kontroversi di Kanada, pemerintah Kanada menganggap PLTN sebagai sumber energi yang penting dan telah mengalokasikan dana untuk pengembangan teknologi nuklir yang lebih aman dan ramah lingkungan.

m. Jerman

Industri nuklir Jerman memiliki kemampuan untuk memproduksi berbagai jenis fasilitas dan reaktor nuklir yang dibutuhkan seperti fasilitas pengayaan uranium, fasilitas produksi bahan bakar nuklir, fasilitas pemrosesan ulang bahan bakar nuklir, dan menjalankan 19 reaktor yang memenuhi sepertiga kebutuhan listrik negara (Ringstad & Szameitat, 2000; Schneider & Froggatt, 2021). Meski sejak 1945 Jerman tidak pernah melakukan usaha serius untuk memperkuat sistem pengiriman senjata strategisnya, sejumlah senjata nuklir ditempatkan di Jerman Barat dan Jerman Timur selama Perang Dingin dimulai pada tahun 1955. Di bawah skema penggunaan bersama nuklir, pasukan Jerman Barat memiliki otoritas untuk menggunakan senjata nuklir AS ketika menghadapi serangan massal dari Pakta Warsawa, dan sejumlah senjata masih disimpan di beberapa fasilitas militer di Jerman Barat.

n. Jepang

Jepang mengalami bencana nuklir Fukushima pada tahun 2011 yang disebabkan oleh gempa bumi dan tsunami yang melanda wilayah itu. Gempa tersebut telah menyebabkan ribuan orang kehilangan nyawa, kerusakan pada PLTN, serta dampak lingkungan yang signifikan. Sejak saat itu, Jepang telah menutup beberapa PLTN dan memperketat aturan keselamatan nuklir (Cherp et al., 2017).

Pengalaman negara-negara di dunia terhadap PLTN menunjukkan bahwa teknologi nuklir dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam menciptakan energi bersih dan andal, tetapi juga memiliki risiko yang signifikan bagi

keselamatan dan lingkungan. Oleh karena itu, perlu dilakukan dengan hati-hati dan memperhatikan keselamatan manusia maupun lingkungan sekitar. Kita harus menyadari besarnya pemanfaatan nuklir masih perlu menghadapi penerimaan masyarakat, sehingga kesalahan fatal dalam pengelolaannya akan terus menjadi sorotan yang akan selalu diingat.

2. PENGEMBANGAN ENERGI NUKLIR NASIONAL

Pada tahun 1950-an, Indonesia memulai pengembangan energi nuklir dengan mengirimkan ilmuwan ke Amerika Serikat untuk mempelajari bidang tersebut. Pada tahun 1954, Indonesia menjadi anggota resmi International Atomic Energy Agency (IAEA), badan internasional yang mempromosikan penggunaan energi nuklir yang aman dan damai. Setelah itu, Indonesia mulai membangun laboratorium nuklir melalui Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) pada tahun 1958 (Sylvia, 2021). Awalnya, fokus pengembangan energi nuklir di Indonesia untuk keperluan medis, pertanian, serta industri. Hal ini terlihat dari kegiatan BATAN pada masa tersebut seperti produksi radioisotop, penelitian radiobiologi, dan pengembangan teknologi untuk mengendalikan serangga hama tanaman (Antariksawan, 2016).

Pada tahun 1964, Indonesia memutuskan untuk membangun PLTN pertama di Kawasan Nuklir Serpong, Tangerang, dengan bantuan dari Uni Soviet. PLTN Serpong mulai beroperasi pada tahun 1983 dan menjadi PLTN pertama di Asia Tenggara. Namun, pengembangan energi nuklir di Indonesia mengalami banyak tantangan, seperti ketergantungan pada teknologi dan bahan bakar dari negara lain, risiko

keamanan, dan lingkungan yang tinggi, serta persepsi masyarakat yang negatif terhadap energi nuklir (Susiati et al., 2022a). Akibatnya pengembangan PLTN lainnya di beberapa lokasi, seperti PLTN Pacitan, PLTN Muria, dan PLTN Bangka Belitung masih mengalami kesulitan dalam mendapatkan dukungan masyarakat (Susiati et al., 2022b). Oleh karena itu, pengembangan energi nuklir di Indonesia harus dilakukan dengan sangat hati-hati dan memperhatikan standar keamanan yang sangat ketat.

Gambar 3.8 *Inspeksi IAEA ke reaktor nuklir di Serpong, Indonesia.*
(Sumber: BATAN, 2021)

Meski menghadapi beberapa tantangan, pengembangan energi nuklir di Indonesia juga mengalami beberapa kemajuan. Indonesia membangun pusat pengembangan teknologi nuklir di Serpong, Tangerang, dengan tujuan untuk mengembangkan teknologi nuklir yang mandiri dan mendorong kerja sama internasional. Saat ini, pemerintah Indonesia mulai menentukan lokasi-lokasi tapak PLTN secara detail di beberapa daerah, baik di Jawa maupun pulau-pulau lainnya. Selain pengembangan PLTN, Indonesia juga mengembangkan teknologi nuklir untuk keperluan medis dan

pertanian. Indonesia telah berhasil memproduksi beberapa jenis radioisotop untuk keperluan medis, seperti radioisotop teknecium-99m dan iodine-131, yang digunakan untuk diagnosis dan pengobatan penyakit (Hakim, 2020). Selain itu, teknologi nuklir juga digunakan untuk meningkatkan produktivitas pertanian melalui pengendalian hama dan penyakit serta peningkatan mutu benih.

Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) telah bertanggung jawab atas pengembangan energi nuklir nasional di Indonesia dan telah menyiapkan berbagai infrastruktur yang dibutuhkan untuk pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional memberikan pedoman pengembangan energi nuklir nasional yang mencakup tujuan, strategi, dan kerangka program pengembangan. Salah satu strategi utama yang dianggap penting adalah mempersiapkan infrastruktur dasar seperti bahan inti serah (BIS), reaktor, dan Fasilitas Pengolahan Limbah Nuklir (FPLN) untuk pembangunan PLTN. Saat ini, Pusat Riset Teknologi Radioisotop, Radiofarmaka dan Biodosimetri (PRTRRB) di dalam naungan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sedang mengembangkan riset biomarker yang diharapkan dapat membantu meningkatkan keselamatan dan keamanan energi nuklir di Indonesia (BRIN, 2022).

Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia masih menjadi topik yang kontroversial dan sulit untuk mencapai kesepakatan. Sebelumnya, pemerintah Indonesia merencanakan untuk membangun PLTN di Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat pada tahun 2040, tetapi rencana tersebut ditunda karena adanya

kontroversi. Pada tahun 2021, Presiden Joko Widodo mengizinkan penambangan bahan baku nuklir di Indonesia, tetapi penggunaan PLTN masih tertunda karena risiko yang mungkin timbul seperti kebocoran dan ledakan. Saat ini, teknologi nuklir di Indonesia hanya digunakan untuk keperluan medis dan riset menggunakan teknologi radioisotop, sehingga belum ada PLTN komersial yang beroperasi di Indonesia.

Pengembangan PLTN di Indonesia menghadapi beberapa kendala. Pertama, pendanaan menjadi kendala utama karena pembangunan PLTN membutuhkan investasi yang besar sedangkan sumber pendanaan terbatas. Kedua, kendala teknis juga terjadi karena PLTN membutuhkan teknologi dan pengalaman yang tinggi untuk mencapai kinerja yang optimal. Ketiga, masalah sosial dan lingkungan juga menjadi hambatan karena adanya kontroversi terkait potensi risiko ledakan dan kebocoran nuklir. Terakhir, masalah regulasi menjadi kendala karena kebijakan yang belum teratur secara detail mengenai teknologi nuklir dan pembangunan PLTN di Indonesia karena masih mengacu pada Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional dan Peraturan Kepala BATAN Nomor 202/KA/X/2012 tentang Rencana Strategis Badan Tenaga Nuklir Nasional.

3. FOLU NET SINK DAN PEMBANGUNAN RENDAH KARBON

FOLU (*forestry and other land use*) Net Sink merujuk pada kapasitas ekosistem daratan seperti hutan, lahan pertanian, dan sebagainya untuk menyerap karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer. FOLU Net Sink merupakan salah satu gas rumah

kaca yang paling umum dan berperan dalam pemanasan global dan perubahan iklim (Goodman & Herold, 2014). Konsep FOLU Net Sink mencakup kemampuan lahan untuk menyerap lebih banyak karbon daripada yang dilepaskan ke atmosfer, sehingga dapat membantu mengurangi jumlah CO_2 di atmosfer. Dalam hal ini, *net sink* berarti lahan tersebut menyerap lebih banyak karbon daripada yang dilepaskan ke atmosfer. Lahan-lahan yang digunakan untuk kegiatan pertanian atau kehutanan dapat menyerap karbon dari atmosfer melalui proses fotosintesis, yaitu proses ketika tumbuhan menggunakan energi dari sinar matahari untuk mengubah CO_2 menjadi bahan organik (Tubiello et al., 2014). Setelah itu, tumbuhan menyimpan karbon tersebut dalam jaringannya. Ketika tumbuhan mati atau terurai, karbon akan dilepaskan kembali ke atmosfer melalui proses respirasi atau pembakaran. Namun, ketika lahan tersebut dikelola dengan baik dan dijaga, tumbuhan dapat menyerap lebih banyak karbon daripada yang dilepaskan. Sebagai contoh, lahan hutan yang dikelola dengan baik dapat menyimpan karbon dalam jaringannya selama puluhan atau bahkan ratusan tahun, sedangkan lahan pertanian yang dikelola dengan baik dapat meningkatkan kadar karbon dalam tanah dan mempertahankan kesuburan tanah.

Peningkatan FOLU Net Sink menjadi penting karena dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan memerangi perubahan iklim. Melalui praktik pengelolaan lahan yang bijaksana, kita dapat memaksimalkan kapasitas ekosistem daratan untuk menyerap dan menyimpan karbon di tanah dan tumbuhan. Di Indonesia, konsep ini dibakukan dalam bentuk. FOLU Net Sink 2030 adalah strategi yang

dirancang oleh pemerintah Indonesia untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengurangi dampak pemanasan global dengan menargetkan penyerapan netto karbon (*net sink*) sebesar setidaknya 41,8 juta ton CO_2 per tahun pada tahun 2030. Strategi ini melibatkan sektor kehutanan dan lahan lainnya, termasuk pengelolaan hutan yang berkelanjutan, restorasi hutan, dan manajemen lahan yang lebih baik untuk meningkatkan karbon di dalam tanah dan air. Tujuan dari strategi ini untuk mencapai *net sink*, yaitu lebih banyak karbon yang diserap oleh tumbuhan dan organisme lainnya dari yang dikeluarkan ke atmosfer sebelum tahun 2030.

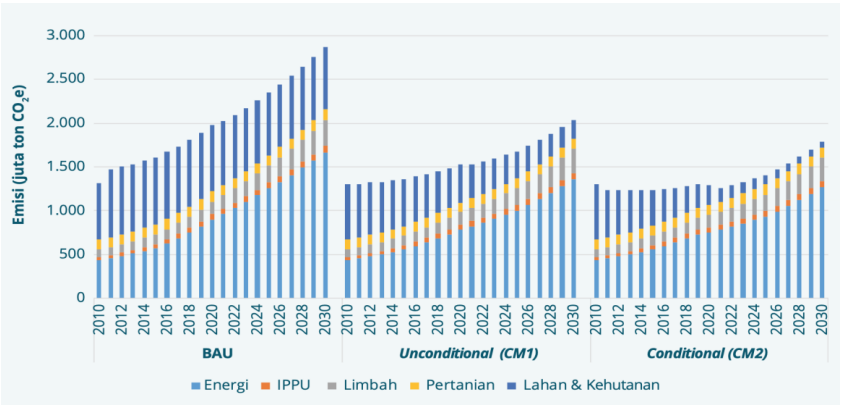
Dengan mencapai target ini, Indonesia berharap dapat memainkan peran penting dalam penyelarasan penurunan emisi gas rumah kaca di seluruh dunia, sesuai dengan Paris Agreement (Ginoga et al., 2022). Untuk mencapai target ini, pemerintah Indonesia akan bekerja sama dengan sektor swasta, masyarakat sipil, dan lembaga internasional untuk meningkatkan kapasitas pengelolaan hutan dan lahan yang berkelanjutan, serta untuk mempromosikan investasi dalam praktik-praktik yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Hal ini juga akan membantu meningkatkan kesejahteraan ekonomi dan sosial di daerah-daerah yang terkena dampak perubahan iklim (Lestari & Noor'an, 2022).

FOLU Net Sink 2030 mengharuskan pengurangan emisi sebesar 29% dari nilai tahun 2005, atau mencapai *net sink* pada tahun 2030. Untuk mencapai tujuan ini, diperlukan upaya di berbagai sektor, termasuk kehutanan dan penggunaan lahan. Secara khusus di sektor kehutanan, diperlukan upaya seperti penanaman pohon, reboisasi, pengelolaan hutan yang berkelanjutan, dan konservasi hutan (Hartoyo et al., 2022). Di

sektor penggunaan lahan, perlu dilakukan upaya seperti pengelolaan lahan yang berkelanjutan, peningkatan biodiversitas, dan konservasi lahan. Selain itu, diperlukan juga upaya lain seperti mengurangi biaya energi dan meningkatkan efisiensi energi, menggunakan energi terbarukan, dan mengurangi penggunaan bahan bakar untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. FOLU Net Sink 2030 dan pembangunan rendah karbon saling berhubungan karena keduanya merupakan bagian dari upaya global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan melawan perubahan iklim. Di Indonesia, program ini diamanahkan kepada Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan sebagai penanggungjawab utama (KLHK RI).

FOLU Net Sink 2030 merujuk pada target global untuk meningkatkan kapasitas ekosistem daratan dalam menyerap dan menyimpan karbon dari atmosfer. Hal ini bertujuan agar mencapai *net sink* global pada tahun 2030, yaitu ketika lahan-lahan pertanian dan hutan secara keseluruhan menyerap lebih banyak karbon daripada yang dilepaskan. Sementara itu, pembangunan rendah karbon melibatkan upaya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca melalui berbagai sektor, termasuk energi, transportasi, industri, dan bangunan, dengan tujuan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan efisiensi energi, serta penggunaan sumber daya yang lebih berkelanjutan (BRIN, 2022). FOLU Net Sink 2030 dan pembangunan rendah karbon saling terkait karena keduanya merupakan bagian dari upaya global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan memerangi perubahan iklim. Selain itu, pembangunan rendah karbon dapat mendorong praktik pengelolaan lahan yang cerdas dan

berkelanjutan, serta dapat meningkatkan kapasitas ekosistem daratan untuk menyerap dan menyimpan karbon (KLHK, 2022).



Gambar 3.9 *Proyeksi dan skenario penurunan emisi mengacu pada FOLU Net Sink.* (Sumber: KLHK RI, 2022)

Dalam sektor energi, FOLU Net Sink harus mempertimbangkan kemungkinan penggunaan energi nuklir sebagai alternatif untuk memenuhi kebutuhan listrik di tingkat nasional dan bahkan regional. Pengembangan PLTN menjadi salah satu opsi dalam memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat, terutama di negara-negara berkembang. PLTN menggunakan reaksi nuklir untuk menghasilkan energi listrik yang tanpa (minim) menghasilkan GRK (Kharecha & Hansen, 2013). Dalam skala besar, PLTN dapat menggantikan pembangkit listrik konvensional yang menggunakan bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam (Hong et al., 2014). Dengan demikian, penggunaan PLTN dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca di sektor energi dan mengurangi jejak karbon dari sektor tersebut secara signifikan.

Meningkatkan keamanan dan ketahanan energi adalah keuntungan tambahan dari pengembangan PLTN karena dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi risiko fluktuasi harga dan pasokan. Namun, penting untuk tidak menganggap PLTN sebagai satu-satunya solusi untuk memenuhi kebutuhan energi yang meningkat karena alternatif energi terbarukan dan efisiensi energi harus turut dipertimbangkan. Penting untuk mengelola pengembangan PLTN dengan baik dan memperhatikan keselamatan dan keamanan serta pengelolaan limbah radioaktif yang aman dan berkelanjutan (Warner & Heath, 2012). Untuk mencapai tujuan pembangunan rendah karbon, solusi energi yang berkelanjutan dan holistik harus dipertimbangkan, serta mempertimbangkan dampak dan manfaat jangka panjang dan melibatkan berbagai sektor (Millot et al., 2020).

4. MENGURANGI *CARBON FOOTPRINT* SEKTOR ENERGI

Jejak karbon adalah ukuran total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh aktivitas atau sektor tertentu, biasanya dinyatakan dalam setara karbon dioksida (CO_2e). Sektor energi adalah salah satu penyumbang emisi gas rumah kaca global terbesar dan memiliki jejak karbon yang signifikan (Rehman et al., 2022). Pada tahun 2019, sektor energi menyumbang sekitar 75% dari total emisi gas rumah kaca global. Sebagian besar emisi tersebut berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak, dan gas alam, untuk menghasilkan listrik dan panas. Selain emisi dari pembangkit listrik, sektor energi juga memiliki jejak karbon

dari produksi dan penggunaan bahan bakar, seperti minyak dan gas alam, untuk keperluan transportasi dan industri (Onat & Kucukvar, 2020). Angka ini terus menurun karena pada tahun 2020, sektor energi mampu mengurangi kontribusinya sebagai penyumbang utama emisi karbon dioksida global sekitar 15 persen. Meski begitu, kondisi ini bisa dipahami akibat pandemi COVID-19.

Penurunan aktivitas ekonomi selama pandemi akibat skema pembatasan wilayah/aktivitas menyebabkan emisi GRK dan jejak karbon (carbon footprint) sektor energi dan transportasi berkurang (Widiawaty et al., 2022; Nurbayani et al., 2023). Sejumlah penelitian menunjukkan penurunan emisi CO2 yang signifikan selama pandemi ini hanya bersifat sementara dan tidak cukup untuk mencapai target mitigasi perubahan iklim dalam jangka panjang.

Saat pandemi COVID-19 terdapat penurunan emisi CO2 sebesar 7% di seluruh dunia selama 2020, dibandingkan dengan tahun sebelumnya (Le Quéré et al., 2020). Penurunan emisi terjadi karena adanya pengurangan konsumsi energi, terutama dari sektor transportasi dan industri. Namun, penurunan ini hanya bersifat sementara dan tidak memberikan kontribusi yang signifikan terhadap mitigasi perubahan iklim jangka panjang (Liu et al., 2020). Studi lain yang dilakukan oleh Global Carbon Project menunjukkan bahwa penurunan emisi GRK selama pandemi tidak akan berdampak signifikan terhadap konsentrasinya di atmosfer, dan akan kembali normal setelah pandemi berakhir (Friedlingstein et al., 2020). Selain itu, kebijakan pemulihan ekonomi pasca pandemi yang tidak berkelanjutan dapat menyebabkan kenaikan emisi GRK yang signifikan. Sejalan

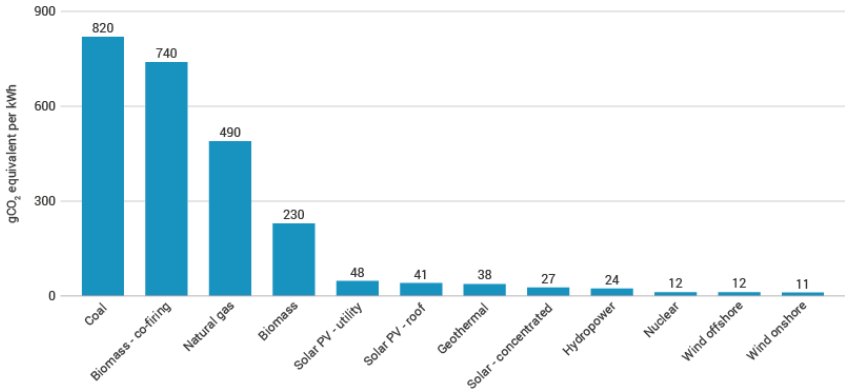
dengan meningkatnya kebutuhan energi, konsumsi energi global diperkirakan akan terus tumbuh seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan populasi. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengurangi emisi karbon di sektor energi melalui pemanfaatan sumber energi bersih dan pengembangan teknologi ramah lingkungan.

Untuk mengurangi jejak karbon sektor energi, perlu dilakukan peralihan dari bahan bakar fosil ke sumber energi rendah karbon, seperti energi terbarukan dan tenaga nuklir. Hal ini membutuhkan peningkatan investasi yang signifikan dalam teknologi dan infrastruktur energi terbarukan, serta pengembangan sistem transportasi dan industri yang lebih berkelanjutan. Selain tantangan teknologi dekarbonisasi sektor energi, ada juga tantangan sosial dan ekonomi yang signifikan dan harus diatasi untuk mengurangi jejak karbon sektor ini.

Tantangan tersebut termasuk kebutuhan untuk mengatasi masalah kemiskinan dan pemerataan energi, khususnya di negara-negara berkembang sebagai akses ke energi terbatas dan ketika akses sumber energi rendah karbon yang terbatas atau lebih mahal (Setyowati,, 2021). Selain itu, ada kebutuhan untuk memastikan transisi ke sistem energi rendah karbon berkelanjutan secara ekonomi, sehingga memerlukan penemuan cara untuk memastikan bahwa biaya dekarbonisasi dibagi secara merata di antara berbagai kelompok dan negara (Sovacool et al., 2017). Secara keseluruhan, mengurangi jejak karbon dari sektor energi merupakan tantangan yang kompleks dan beragam serta memerlukan serangkaian solusi sosial, ekonomi, dan teknologi.

Energi nuklir dapat membantu mengurangi *carbon footprint* dengan menggantikan sumber energi lain yang menghasilkan karbon, seperti batu bara atau minyak. Bahkan, jika dikelola dengan benar, energi nuklir dapat menghasilkan produksi listrik yang lebih bersih dan efisien. Dengan energi nuklir untuk memproduksi listrik, kita dapat mengurangi emisi karbon dan membantu mengurangi dampak perubahan iklim. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa energi nuklir dapat mengurangi emisi karbon lebih dari 50% dibandingkan dengan menggunakan batu bara untuk memproduksi listrik (Renn & Marshall, 2016; US EIA, 2021). Selain itu, energi nuklir juga sangat aman dan efisien. Prosesnya dapat diatur dengan sangat ketat untuk memastikan bahwa tidak ada emisi karbon yang dihasilkan dan untuk menjamin bahwa proses berlangsung aman.

PLTN dapat mengurangi *carbon footprint* dengan bahan bakar berupa uranium yang tanpa memancarkan gas efek rumah kaca ke atmosfer. Proses yang digunakan dalam PLTN adalah proses fisi nuklir. Pada proses ini, bahan bakar uranium akan dipanaskan di dalam reaktor nuklir. Panas yang terjadi akan digunakan untuk mengubah air menjadi *steam* dan kemudian akan menggerakkan turbin yang dapat menghasilkan energi listrik. Karena tidak ada pembakaran yang terjadi, maka tidak ada polusi atau gas efek rumah kaca yang dipancarkan ke atmosfer.



Gambar 3.10 *Life-cycle CO_2 untuk tiap tipe pembangkit listrik.*
(Sumber: IPCC via World Nuclear Association, 2022)

Dari segi *life cycle analysis*, residu bahan bakar dari operasional PLTN dapat diolah lebih lanjut agar bisa digunakan kembali (Lenzen, 2008). Pada dasarnya, proses daur bahan bakar nuklir cukup panjang yang umumnya terbagi atas dua pilihan, yaitu daur terbuka dan daur tertutup (Barbat & Liberge, 2013). Untuk keduanya, dimulai dari tambang uranium dan diteruskan ke bagian kanan bawah ampai ke PLTN. Ada dua alternatif jalur: pertama bagi PLTN jenis LWR (PWR dan BWR), bahan hasil pemurnian uranium dijadikan (konversi) gas UF6, lalu dikirim ke pabrik pengayaan untuk memperkaya kadar uranium-235 menjadi 3-4 persen. Kemudian, dikonversi kembali menjadi oksida uranium untuk dibuat menjadi perangkat bahan bakar di pabrik pembuatan bahan bakar. Jalur alternatifnya yaitu uranium langsung dibentuk menjadi oksida dan dikirim ke pabrik bahan bakar, khusus untuk daur PLTN HWR yang tidak memerlukan perkayaan uranium. Kemudian untuk daur terbuka, sesudah penggunaan di dalam PLTN, daur bahan bakar berakhir di tempat penyimpanan bahan bakar. Untuk daur tertutup, dilanjutkan ke pengolahan-ulang, penyimpanan

limbah tingkat tinggi dan pendauran-ulang bahan fisil kembali ke pabrik pembuatan bahan bakar.

Daur ulang bahan bakar bekas dari PLTN dapat memberikan manfaat lingkungan yang signifikan dengan mengurangi jumlah limbah radioaktif dan emisi gas rumah kaca. Menurut Badan Energi Atom Internasional (IAEA), teknologi daur ulang bahan bakar bekas dari PLTN dapat mengurangi volume limbah radioaktif hingga 95% dan mengurangi kebutuhan bahan bakar baru sebesar 20-30% (Bernard, 2007; Del Cul, 2007). Namun, meski daur ulang bahan bakar bekas dari PLTN dapat membantu mengurangi dampak lingkungan, tetap ada beberapa masalah terkait keamanan dan risiko kesehatan yang harus dipertimbangkan. Oleh karena itu, proses daur ulang bahan bakar bekas dari PLTN harus dilakukan dengan hati-hati dan dengan mengikuti prosedur yang ketat.

LPBINU
LEMBAGA PENANGGULANGAN BENCANA
& PERUBAHAN IKLIM
NAHDLOTUL 'ULAMA

BAB_4

KEHADIRAN PLTN DEMI MENCAPAI NET ZERO EMISSION

1. NET ZERO EMISSION (NZE)

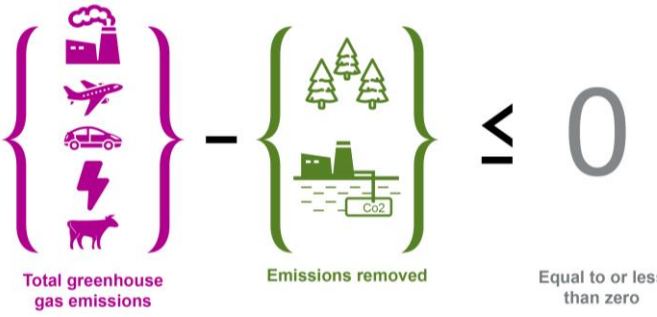
Net Zero Emission (NZE) atau nol emisi karbon merupakan konsep keseimbangan antara jumlah GRK, terutama karbon dioksida dan methana, yang dilepaskan ke atmosfer dengan jumlah yang dapat diserap oleh bumi (Davis et al., 2018; Matemilola & Salami, 2020). Upaya transisi dari sistem energi saat ini ke sistem energi bersih diperlukan untuk mencapai kondisi seimbang antara emisi GRK dari aktivitas manusia dan kemampuan alam untuk menyerap gas-gas tersebut. NZE merupakan situasi ketika jumlah emisi karbon yang dilepaskan ke atmosfer tidak melebihi jumlah emisi yang diserap oleh sumber daya alam seperti hutan, sehingga mencapai emisi neto nol. Dalam konteks kekhawatiran terhadap perubahan iklim yang semakin nyata, konsep ini menjadi penting untuk mengatasi aneka dampaknya seperti peningkatan suhu global, ketidakpastian musim hujan, dan ancaman bencana hidrometeorologis yang semakin intensi.

Konsep NZE menjadi tantangan bagi semua orang, dari penggunaan alat pemanas atau pendingin ruangan hingga pengisian bahan bakar kendaraan yang semuanya melepaskan gas rumah kaca ke atmosfer. Dampak lain yang turut dirasakan dari meningkatnya GRK dan perubahan iklim global yaitu terkait musim hujan menjadi tidak menentu dan banjir besar yang melanda berbagai daerah di dunia (Dede et al., 2019; Dede et al., 2023a). Oleh sebab itu, tujuan dari mencapai kondisi NZE adalah untuk membantu mengurangi dampak perubahan iklim yang saat ini mulai terasa.

Pada tahun 2015, kekhawatiran tentang perubahan iklim dan dampaknya diungkapkan dalam Paris Climate Agreement

(Delbeke et al., 2019). Lebih dari 195 perwakilan negara hadir dalam kesepakatan ini. Pada tanggal 22 April 2016 Paris Agreement ditandatangani sebagai upaya untuk mengatasi masalah perubahan iklim. Salah satu tujuan dari kesepakatan ini adalah melakukan transisi dari penggunaan energi fosil ke sumber energi yang lebih ramah lingkungan, dengan fokus pada sektor energi. Negara-negara yang terlibat sepakat untuk menjaga peningkatan suhu rata-rata global di bawah 2 ^{o}C atau bahkan lebih baik lagi, di bawah 1.5 ^{o}C (Falkner, 2016).

Program NZE yang ditetapkan dalam kesepakatan ini mengharuskan negara-negara industri mencapai nol emisi pada tahun 2050. Oleh karena itu, banyak negara mulai mengatur kebijakan baru terkait penyediaan energi listrik, terutama dalam mengurangi emisi karbon dari pembangkit listrik konvensional seperti PLTU yang masih mendominasi sistem ketenagalistrikan di banyak negara, termasuk Indonesia. Sejumlah negara seperti Jerman, Chili, Tiongkok, Denmark, Spanyol, Afrika Selatan, Amerika Serikat, India, Italia, dan Meksiko telah mencoba untuk memperluas penggunaan sumber energi terbarukan dalam penyediaan energi listrik dengan mempertimbangkan kondisi sosial ekonomi, profil energi, konsumsi per kapita, dan emisi (Aprilianto & Ariefianto, 2021).



Gambar 4.1 *Skema dasar NZE.* (Sumber: The Scottish Parliament, 2019)

2. STRATEGI DAN IMPLEMENTASI NZE

Penerapan strategi dan implementasi NZE perlu melibatkan semua pihak dari lingkup nasional, daerah, hingga lokal. Semua pihak harus menyadari bahwa mencapai tujuan NZE akan memberikan kontribusi positif untuk masa depan lingkungan dan kesehatan manusia (BRIN, 2022). Strategi dan implementasi NZE untuk Indonesia dapat dilakukan dengan mengikuti beberapa langkah sebagai berikut:

a. Menganalisis emisi Gas Rumah Kaca (GRK) yang dihasilkan oleh organisasi atau perusahaan. Proses audit emisi GRK untuk mengetahui sumber-sumber emisi yang paling signifikan sangat diperlukan dan harus dilakukan secara berkala.

b. Menentukan target NZE yang realistis. Setelah mengetahui sumber-sumber emisi yang signifikan, penting untuk menentukan target NZE yang dapat dicapai dalam waktu tertentu.

c. Membuat rencana aksi. Langkah ini baru bisa dilakukan setelah menetapkan target. Rencana aksi harus mencakup strategi pengurangan emisi GRK, investasi dalam teknologi bersih, penggunaan energi terbarukan, dan tindakan lain yang relevan.

d. Melakukan evaluasi risiko terhadap rencana aksi, termasuk mempertimbangkan kemungkinan perubahan kebijakan, fluktuasi harga energi, dan faktor lain yang dapat memengaruhi implementasi NZE.

e. Meningkatkan efisiensi energi dengan mengadopsi teknologi yang lebih efisien, memperbaiki sistem dan

infrastruktur yang sudah ada, serta melakukan perubahan pada perilaku karyawan untuk mengurangi konsumsi energi.

f. Mengadopsi teknologi bersih, seperti energi terbarukan, mobil listrik, dan penggunaan bahan bakar bersih dapat membantu mengurangi emisi GRK.

g. Mengembangkan rencana tindakan darurat. Langkah ini penting untuk menghadapi situasi yang mengancam lingkungan dan kesehatan manusia. Rencana ini harus diawasi dan dievaluasi secara berkala untuk memastikan efektivitasnya.

h. Melakukan monitoring dan pelaporan. Pemerintah dan instansi terkait harus secara teratur memantau emisi GRK, serta mencatat kemajuan dalam mencapai target NZE. Pelaporan secara teratur dan terbuka harus menjadi kewajiban agar orang lain dapat mengetahui upaya dalam mencapai target NZE.

Upaya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca di Indonesia bertujuan untuk menurunkan sebesar 29% pada tahun 2030 melalui upaya independen, dan 41% dengan bantuan internasional (Budiarso, 2019). Upaya ini difokuskan pada sektor energi, transportasi, industri, pertanian, kehutanan, dan limbah. Untuk mencapai tujuan tersebut, pemerintah Indonesia telah melakukan beberapa tindakan seperti mempromosikan penggunaan energi terbarukan, mengenalkan kendaraan listrik, menggalakkan pertanian berkelanjutan, serta memperbaiki manajemen limbah (Hastomo et al., 2022). Selain itu, Indonesia juga berkerja sama dengan negara dan organisasi internasional untuk mendapat-

kan dukungan teknologi, pembiayaan, dan kapasitas dalam mencapai target pengurangan emisi. Meski demikian, masih ada beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti meningkatkan partisipasi masyarakat dan kesadaran serta memperkuat kapasitas institusi, selain kebutuhan akan investasi yang lebih besar.

Strategi dan implementasi untuk mencapai NZE berbeda-beda di berbagai negara, tergantung pada situasi geografis, kebijakan, dan sumber daya yang tersedia. Namun, terdapat kesamaan yakni dari mempercepat transisi ke energi terbarukan, meningkatkan efisiensi energi, mendorong penggunaan transportasi bersih, mengurangi emisi dari industri, mengadopsi kebijakan iklim yang ambisius, menyediakan sumber daya untuk perubahan, serta meningkatkan kesadaran publik (Black et al., 2021; Zhang et al., 2022). Sebagai *lesson studies*, terdapat tiga negara yang bisa menjadi contoh untuk memahami upaya untuk mencapai NZE yang mewakili kelompok negara maju dan berkembang. Pada tahun 2035, Inggris Raya memiliki beberapa kebijakan untuk mencapai NZE, antara lain:

a. Memasok listrik bersih sesuai dengan ketersediaan pasokan. Pemerintah Inggris mengamankan keputusan investasi untuk pembangkit nuklir skala besar dan meluncurkan dana pengaktifan nuklir masa depan senilai £120 juta.

b. Inggris juga akan mempertahankan opsi untuk teknologi nuklir masa depan, termasuk *small modular reactor* yang akan ditempatkan di sejumlah lokasi potensial seperti Wylfa, Wales Utara.

c. Pada tahun 2030, Inggris menargetkan 40GW pembangkit listrik rendah karbon, termasuk 1GW pembangkit listrik tenaga angin di garis pantai Laut Utara dan Celtic dengan pendanaan mencapai ratusan juta Euro.

Negara maju lain yang bisa menjadi rujukan adalah Jepang. Pemerintah Jepang mulai menerapkan tindakan prioritas guna menurunkan emisi GRK menggunakan teknologi yang telah ada di pasaran. Mereka meyakini adanya efek domino dekarbonisasi harus diimplementasikan di seluruh negara, dan akhirnya terwujudlah masyarakat lokal yang berkelanjutan dan terbebas dari emisi karbon (Nakazawa et al., 2023). Beberapa contoh dari realisasi NZE di negara tersebut, yakni:

a. Memanfaatkan sumber daya energi terbarukan yang belum digunakan dengan mengimplementasikan langkah seperti "sewa atap" untuk panel surya.
b. Meningkatkan konservasi energi di rumah tangga dan fasilitas umum.
c. Mempromosikan pembagian kendaraan listrik yang ditenagai oleh sumber energi terbarukan, fasilitas umum yang ditenagai oleh 100% energi terbarukan, serta transportasi umum dengan nol emisi.
d. Mengoptimalkan pengelolaan melalui konservasi dan penyimpanan energi serta IoT di wilayah kecil.

Negara berkembang yang mulai menerapkan NZE adalah Brasil (Fragkos et al., 2021; Chapungu et al., 2022). Berbagai upaya komprehensif telah dilakukan oleh pemerintah Brasil

untuk mencapai emisi nol bersih dan menuju ekonomi rendah karbon, antara lain:

a. Menetapkan tujuan ambisius untuk mengurangi emisi karbon sebesar 37% pada tahun 2025 dan menerapkan kebijakan, seperti penetapan harga karbon, insentif pengembangan energi terbarukan, serta program lelang energi terbarukan.

b. Mengembangkan sumber energi terbarukan, termasuk tenaga surya, angin, dan air, serta mendorong pertumbuhan ekonomi hijau dan praktik bisnis hijau.

c. Pemerintah Brasil telah mengambil langkah-langkah untuk meningkatkan penegakan peraturan lingkungan, termasuk tindakan keras terhadap penebangan liar.

d. Pemerintah Brasil juga mempromosikan penggunaan lahan yang berkelanjutan dan perubahan penggunaan lahan, seperti reboisasi dan pemulihan ekosistem yang terdegradasi. Selama dekade terakhir, Brasil berhasil mengurangi emisi karbonnya sekitar 50% dan kini berada di jalur yang tepat untuk mencapai target emisi nol bersih pada tahun 2025.

3. TANTANGAN IMPLEMENTASI NZE

Untuk mencapai target emisi nol bersih, ada beberapa tantangan yang perlu diatasi dan harus dicari solusi untuk mengurangi dampaknya agar capaian tidak terganggu. Saat ini, masalah mencapai NZE sangatlah mendesak karena emisi gas rumah kaca yang berkelanjutan, terutama karbon dioksida ke atmosfer, menyebabkan dampak lingkungan fisik dan

sosial yang serius seperti gelombang panas yang lebih intens, angin topan, kekeringan, dan kenaikan permukaan laut (Lu et al., 2022). Untuk mengurangi dampak ini secara pragmatis dan mencegah dampak terburuk dari perubahan iklim di masa mendatang, perlu dilakukan pengurangan emisi gas rumah kaca secara global hingga mencapai nol atau mendekati nol (Jha, 2010; Thomas & López, 2015; Heidari & Pearce, 2016). Namun, mencapai target emisi nol bersih memiliki tantangan yang sangat kompleks dan beragam, serta melibatkan berbagai faktor sosial, ekonomi, dan teknologi. Salah satu tantangan utama adalah mengurangi emisi dari sektor energi yang menjadi penyumbang terbesar dari emisi gas rumah kaca di dunia. Oleh karena itu, diperlukan transisi dari penggunaan bahan bakar fosil ke sumber energi yang rendah karbon, seperti energi terbarukan dan tenaga nuklir.

Untuk mencapai NZE diperlukan investasi besar untuk menyediakan teknologi yang dibutuhkan. Sumber energi terbarukan seperti tenaga angin dan matahari memiliki potensi untuk menyediakan listrik rendah karbon dalam skala besar, tetapi juga membutuhkan biaya awal yang besar untuk membangun dan operasional infrastruktur tersebut. Indonesia juga menghadapi tantangan serupa yaitu dana yang dibutuhkan untuk mencapai NZE mencapai puluhan triliun rupiah, sementara anggaran pemerintah hanya cukup untuk menutup sepertiganya. Selain itu, tantangan besar lainnya dalam mencapai NZE adalah mendekarbonisasi sektor transportasi. Sektor ini merupakan penyumbang signifikan dari emisi gas rumah kaca global dan tumbuh paling cepat. Diperlukan peralihan dari kendaraan bahan bakar fosil ke kendaraan listrik dan kendaraan bahan bakar alternatif, serta

pengembangan infrastruktur transportasi yang lebih berkelanjutan seperti jalur transportasi umum dan sepeda (Rogers et al., 2007; Ashnani et al., 2015; Stančin et al., 2020).

Untuk mencapai dekarbonisasi lingkungan secara penuh, diperlukan penelitian dan inovasi untuk mengurangi biaya pemenuhan teknologi, mengingat masyarakat belum sepenuhnya siap dalam menggunakan energi secara efisien. Meski bahan bakar non-fosil seperti hidrogen dan biofuel lebih mahal, saat ini mereka menyimpan energi lebih sedikit per satuan volume dibandingkan minyak bumi, gas alam, maupun batu bara. Di sisi lain, penggunaan bahan bakar non-fosil juga masih dibatasi oleh ketersediaan anggaran dan kebutuhan dalam masa uji coba. Adapun penggunaan jenis energi terbarukan tertentu, seperti biofuel yang berbahan dasar dari tanaman pangan seperti kedelai, ubi kayu, kacang tanah, dan tebu, dapat membahayakan ketahanan pangan suatu negara yang mengandalkan makanan pokok dari komoditas tersebut (Wilkinson & Herrera, 2010; Nogueira & Capaz, 2013). Penggunaan biofuel tentu akan berdampak pada ketersediaan lahan tanaman yang saat ini justru terancam oleh *urbanizing landscape* (Dede et al., 2022a; Dede et al., 2022b). Oleh karena itu, pemilihan dan proporsi sumber energi terbarukan perlu direncanakan dengan baik.

Hingga saat ini, berbagai negara menghadapi tantangan dalam mencapai NZE karena kurangnya kebijakan yang berfokus pada perubahan jangka panjang dalam sektor energi. Akibatnya sektor-sektor lain seperti industri, transportasi, perumahan, dan komersial masih turut menjadi penyumbang besar dalam emisi global (Matemilola & Salami, 2020). Kita semua hasrus menyadari adanya tantangan sosial dan

ekonomi yang signifikan. Hal ini harus diatasi untuk mencapai NZE seperti isu kemiskinan dan pemerataan energi. NZE terasa efetktif bagi negara-negara maju, tetapi bagi negara-negara berkembang dengan akses energi yang terbatas, proses mencari sumber energi rendah karbon menghadirkan isu baru di tingkat nasional (Rustam et al., 2023). Kebutuhan untuk mengatasi emisi dari pertanian, penggunaan lahan, dan deforestasi juga menjadi tantangan penting dalam mencapai NZE. Sektor-sektor ini bertanggung jawab atas bagian yang signifikan dari emisi GRK global dan sulit untuk didekarbonisasi karena interaksi yang kompleks antara faktor lingkungan, sosial, dan ekonomi. Pengendalian emisi untuk sektor-sektor tersebut sulit diatasi karena seringkali didorong oleh berbagai berbenturan dengan fenomena kemiskinan, pertumbuhan populasi, dan masalah penguasaan lahan.

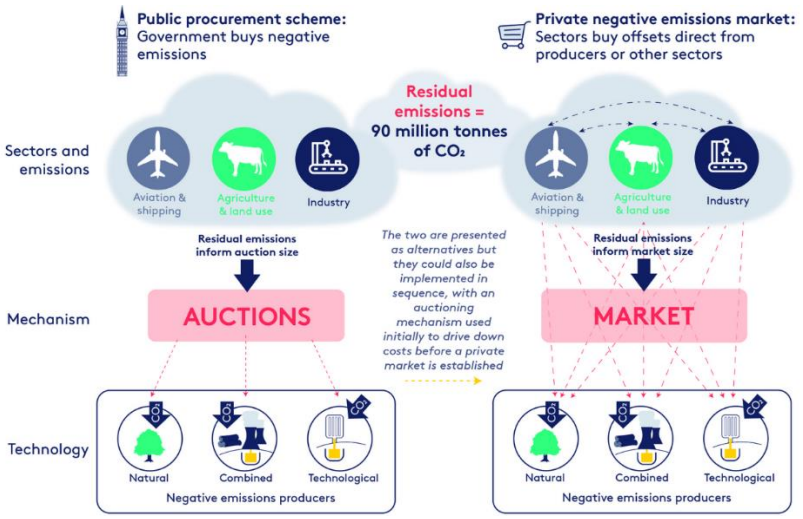
4. PLTN DAN CAPAIAN NZE

Saat ini PLTN belum dipilih untuk dikembangkan dalam rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) karena biaya Engineering Procorument Construction (EPC), pengelolaan bahan bakar habis, dan biaya *dekomisioning* yang masih belum jelas. Keputusan untuk membangun PLTN tidak hanya berdasar pada pertimbangan ekonomi, melainkan juga mempertimbangkan aspek politik, keselamatan, sosial, budaya, dan lingkungan. Karena adanya berbagai faktor tersebut, pemerintahlah yang akan memutuskan untuk membangun PLTN (Sugiyono, 2010). Namun, upaya pembangunan PLTN terus dilakukan dengan serius sebab PLTN dapat mendukung tujuan emisi nol bersih dengan

menyediakan sumber listrik yang andal dan rendah karbon. Tidak seperti pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil yang mengeluarkan sejumlah besar karbon dioksida dan gas rumah kaca ke atmosfer, PLTN hampir tidak menghasilkan emisi karbon secara langsung karena dikenal sebagai *dispatchable non-renewable "on-demand" sources* (Davis et al., 2018; Price et al., 2023). Sebaliknya, PLTN menghasilkan listrik dengan memanfaatkan energi yang dilepaskan melalui reaksi nuklir yang dapat dipertahankan melalui fisi terkontrol isotop uranium maupun plutonium.

PLTN dapat memainkan peran penting dalam membantu mengurangi emisi gas rumah kaca secara keseluruhan dan mengurangi dampak perubahan iklim (Permana et al., 2022). Misalnya, negara-negara yang sangat bergantung pada tenaga nuklir, seperti Prancis, memiliki emisi karbon per kapita terendah di dunia. Dengan menyediakan pasokan listrik rendah karbon yang stabil, PLTN dapat membantu menggantikan sumber energi intensif karbon dan memfasilitasi transisi ke sistem energi yang lebih berkelanjutan (Das et al., 2023). Selain itu, banyak PLTN yang ada memiliki potensi untuk dipasang kembali dengan teknologi baru yang dapat meningkatkan efisiensinya dan mengurangi emisinya lebih jauh lagi. Sebagai contoh, reaktor canggih dan siklus bahan bakar, seperti yang didasarkan pada reaktor modular kecil, sangat meningkatkan keberlanjutan dan keamanan tenaga nuklir. Namun, penerapan tenaga nuklir sebagai solusi untuk mengurangi emisi menghadapi tantangan dan kontroversi. Kekhawatiran tentang pengelolaan limbah nuklir, risiko kecelakaan, dan proliferasi senjata nuklir terus menjadi isu utama yang harus ditangani agar tenaga nuklir

mencapai potensi penuhnya sebagai sumber energi rendah karbon.



Gambar 4.2 *Skema untuk mencapai emisi GRK bernilai negatif.* (Sumber: CCCEP at University of Leeds, 2019)

Dari segi keberlanjutan ekonomi, harga listrik dari PLTN juga dianggap stabil, artinya harganya kurang rentan terhadap fluktuasi harga bahan bakar atau faktor lainnya (Karakosta et al., 2013). Hal ini karena PLTN menggunakan bahan bakar nuklir yang memiliki daya energi yang sangat tinggi dan kebutuhannya relatif sedikit dibandingkan dengan bahan bakar fosil (Forsberg, 2009; Ruth et al., 2014). Untuk dapat mencapai target NZE, PLTN juga harus menggunakan teknologi-teknologi ramah lingkungan seperti sistem pengontrol pemancar yang mampu membatasi jumlah radioisotop yang dilepaskan ke lingkungan selama reaktor beroperasi. PLTN memerlukan teknologi penyimpanan panas muktakhir untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan system. Efisiensi harus mengacu pada kaidah *reduce* dan

recycling yakni pengurangan GRK dapat dilakukan dengan mengurangi emisi dari siklus bahan bakar nuklir serta meminimalkan emisi dari operasi PLTN (Buongiorno et al., 2019).

BAB_5

KESIAPAN INFRASTRUKTUR PEMBANGUNAN PLTN

1. TAPAK POTENSIAL PLTN

Studi PLTN di Indonesia telah dilakukan sejak tahun 1956 dengan bantuan fasilitas dari Uni Soviet. Beberapa studi yang telah dilakukan meliputi kelayakan teknis, ekonomi, sosial, dan lingkungan untuk pembangunan dan operasional PLTN di Indonesia. Penelitian terkait lokasi potensial uranium dan thorium sudah sejak lama dilakukan di Indonesia sejak masa pemerintahan Presiden Soekarno. Proses identifikasi telah dilakukan untuk menyiapkan kesesuaian lokasi PLTN. Lokasi tersebut berada di semenanjung Muria, Banten, Pulau Bangka, Kalimantan Timur, Kalimantan Barat, Batam, dan Nusa Tenggara Barat. Dari semua yang sudah teridentifikasi, Bangka merupakan lokasi yang paling siap dibangun PLTN.

Sejauh ini, Indonesia memiliki tiga tapak PLTN yang sudah diuji kesesuaiannya yakni tapak Muria, Bangka Barat, dan Bangka Selatan. Lebih detail, tapak Muria dapat menampung hingga 7.000 MWe, sementara tapak di Bangka dapat menampung 10.000 MWe dengan rincian 4 x 1.000 MWe di Bangka Barat dan 6 x 1.000 MWe di Bangka Selatan (BRIN, 2022). Selain itu, dari segi keamanan, seperti aktivitas tektonik dan vulkanik (seismik), Kalimantan Barat merupakan wilayah yang paling sesuai untuk dibangun tapak PLTN serta memiliki areal pesisir yang stabil dari segi geodinamika (Susiati et al., 2022c; Dede et al., 2023b). Potensi bencana bukan hanya kriteria satu-satunya yang digunakan dalam menentukan kesesuaian tapak PLTN, tetapi diperlukan sejumlah parameter fisik dan sosial untuk mengkaji kesesuaian tapak.

Penentuan tapak potensial PLTN biasanya dilakukan dengan menggunakan metode numerik dan Sistem Informasi Geografis (SIG) (Widiawaty, 2019). Metode ini bertujuan untuk mengidentifikasi daerah potensial yang cocok untuk pembangunan PLTN dengan mempertimbangkan aneka kondisi geografis, sumber daya alam, sosial-ekonomi, kebijakan/regulasi, aksesibilitas, dan aspek keselamatan. Setiap parameter untuk penentuan lokasi potensial bagi pembangunan dan operasional PLTN harus dipadukan dengan metode ilmiah sebagai dasar untuk memilih. Dalam banyak kajian, banyak metode pengambilan keputusan yang bisa peneliti gunakan untuk menjawab persoalan ini seperti Overlay Analysis, Principal Component Analysis (PCA), Analytical Hierarchy Processes (AHP), dan lain sebagainya (Susiati et al., 2022b). Pemilihan tapak PLTN merupakan proses berjenjang yang berarti upaya ini harus mulai dari ruang lingkup area luas, kemudian terus direduksi hingga diketahui detail lokasi potensialnya (Cho et al., 2021). Dalam pemilihan tapak potensial untuk PLTN memerlukan aneka kajian pendukung guna memastikan kesesuaiannya dari beragam aspek (lingkungan, sosial, dan ekonomi) hingga mendetail.

Sejauh ini, rencana pembangunan PLTN di Indonesia sudah cukup matang. Studi penerimaan publik terkait pembangunan PLTN juga sudah pernah dilakukan guna mengetahui sejauh mana masyarakat mau menerima keberadaan PLTN di lingkungan yang mereka huni. Masyarakat tidak keberatan apabila PLTN dibangun di wilayah mereka tinggal dengan alasan yang beragam, antara lain nuklir mampu menjadi pilihan energi yang berkelanjutan,

harga listrik menjadi lebih terjangkau, menyediakan lapangan kerja baru, transfer teknologi, dan rendah emisi (Rial & Mudjiono, 2016). Namun, tidak semua orang menerima PLTN, sejumlah kelompok menolak dan khawatir terhadap bahaya yang dapat mengancam seperti risiko kecelakaan, limbah radioaktif, dan kesiapan SDM yang dianggap belum mumpuni (Sugiawan & Managi, 2019; Walhi, 2019).

2. *LIFE CYCLE* PLTN

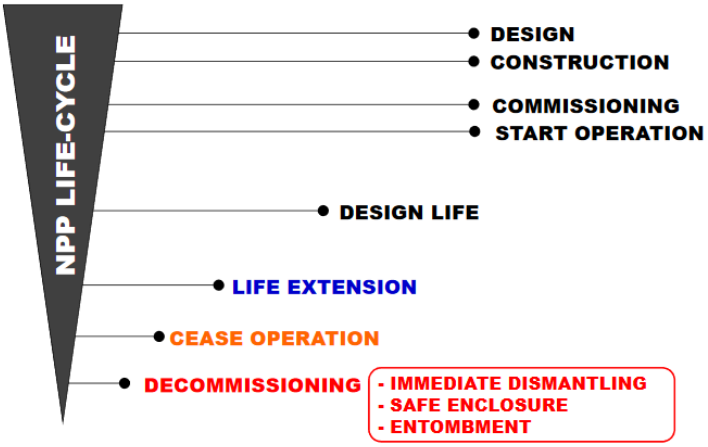
Tahap awal pengoperasian PLTN adalah mendesain dan membangun tapak dengan mengacu pada hasil analisis detail untuk memastikan keselamatan, keamanan, dan kesehatan masyarakat serta lingkungan sekitar. Setelah PLTN siap dioperasikan, pengoperasiannya harus terus dipantau, dilakukan analisis kinerjanya, peningkatan peralatan, dan pemeliharaan yang ketat untuk memastikan keselamatan dan keamanan (Bildirici, 2020). PLTN dirancang untuk beroperasi hingga 40-60 tahun dengan masa perpanjangan (*life extention*) 10 hingga 20 tahun dengan catatan ada upaya ekstra dari pengelola untuk meningkatkan kinerjanya (Koltun et al., 2018).

Masa operasional PLTN juga tergantung pada kondisi fisik dan kinerja peralatan yang digunakan. Apabila PLTN sudah mencapai usia maksimum atau mengalami kerusakan yang serius, maka harus dilakukan proses *decommissioning* atau penghentian operasi dengan aman dan memperhatikan aspek lingkungan (Seier & Zimmermann, 2014). Proses *decommissioning* mencakup pembongkaran dan penghapusan instalasi PLTN. Kemudian, perlu pemantauan lingkungan

berkala untuk memastikan tidak ada dampak negatif pada lingkungan dan masyarakat sekitar. Proses *decommissioning* juga melibatkan pemulihan dan pengolahan limbah nuklir yang dihasilkan selama operasional PLTN. Limbah nuklir harus diolah dan dibuang dengan aman untuk menghindari dampak radiasi dan lingkungan yang merugikan. Proses *decommissioning* harus dilakukan dengan hati-hati dan sesuai dengan prosedur yang telah ditetapkan untuk memastikan keselamatan dan kesehatan masyarakat serta lingkungan sekitar.

Guna memastikan PLTN dapat beroperasi sesuai siklus hidupnya, maka perlu dilakukan suatu kegiatan yang dapat memantau kelayakan PLTN. Kegiatan tersebut terintegrasi dalam *life cycle management* (LCM) yang merupakan bentuk dari rekayasa PLTN, operasi, pemeliharaan, perizinan, perencanaan, dan kegiatan lainnya. LCM merupakan serangkaian kegiatan yang sangat penting untuk memastikan PLTN dapat beroperasi secara optimal sesuai dengan siklus hidupnya yang dirancang (Tashlykov et al., 2014; Riznic, 2017). LCM bertujuan untuk mengelola kondisi material pembangkit listrik, mengoptimalkan masa operasi baik keputusan perpanjangan atau penghentian izin, serta memaksimalkan nilai PLTN dengan tetap menjaga keamanan (IAEA, 2004; Wallbridge et al., 2013). Dalam LCM, dilakukan pengawasan dan pemantauan secara berkala terhadap kondisi PLTN, termasuk peralatan dan material yang digunakan. LCM melibatkan banyak aspek, seperti manajemen risiko, pemeliharaan peralatan, pengendalian kualitas, perencanaan perpanjangan masa operasi, dan pemenuhan persyaratan perizinan. Dalam pengambilan keputusan terkait

perpanjangan masa operasi atau penghentian operasi PLTN, LCM menjadi penting untuk memastikan bahwa keputusan tersebut didasarkan pada data dan informasi yang akurat, serta mempertimbangkan aspek keselamatan dan keamanan.



Gambar 5.1 Life-cycle *untuk PLTN.* (Sumber: IAEA, 2002)

LCM pada PLTN merupakan proses sistematis, meliputi tahap desain, konstruksi, *commissioning*, operasional, pemeliharaan, perpanjangan umur, serta *decommissioning*. Terkait hal itu, pemerintah Indonesia memastikan dan berkomitmen penuh untuk melaksanakan prosedur keselamatan, keamanan, dan pengamanan bahan radioaktif sesuai dengan standar internasional. Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten) adalah lembaga yang bertanggung jawab atas pengawasan, pengaturan, dan perlindungan keselamatan serta keamanan penggunaan tenaga nuklir di Indonesia. Sebagai bagian dari tanggung jawabnya, Bapeten melakukan koordinasi nasional, pendidikan, pelatihan, studi lapangan, dan kerja sama internasional dalam upaya meningkatkan keselamatan dan keamanan penggunaan tenaga nuklir di Indonesia. Bapeten juga memiliki aturan yang mengharuskan

reaktor untuk diperiksa dan ditelaah setiap tiga bulan sekali untuk memastikan bahwa PLTN tetap beroperasi dengan aman. Selain itu, Bapeten juga mengatur prosedur *decommissioning* yang harus diikuti ketika PLTN mencapai akhir masa operasinya. Prosedur *decommissioning* bertujuan untuk menutup seluruh instalasi PLTN atau sebagian instalasi, atau membongkar semua instalasi reaktor dengan cara yang aman dan efektif (Nurokhim & Sumarbagiono, 2013).

Pilihan prosedur yang dapat dipilih tergantung pada pertimbangan tertentu seperti kondisi instalasi, tingkat kerusakan, dan aspek keamanan. Dalam melakukan *decommissioning*, Bapeten bekerja sama dengan pihak-pihak terkait lainnya seperti pemerintah, pemilik PLTN, dan ahli teknis untuk memastikan bahwa prosedur yang diambil sesuai dengan standar internasional agar meminimalkan dampak negatif bagi lingkungan dan masyarakat sekitar (Cheon et al., 2018; Park et al., 2022).

Pengembangan PLTN di Indonesia bukan hanya sekadar wacana, karena saat ini sudah mampu mengoperasikan reaktor nuklir untuk keperluan penelitian dan pengembangan energi maupun untuk bidang-bidang lainnya. Indonesia memiliki 3 reaktor yaitu Bandung Triga (Bandung), Kartini Reactor (Yogyakarta), dan GA Siwabessy Reactor (Banten) yang masing-masing mulai dioperasikan di tahun yang berbeda (Nababan, 2008; Alamsyah, 2022). Reaktor Triga mencapai kondisi kritis pertama pada Oktober 1964 lalu diresmikan pada 20 Februari 1965. Berdasarkan hasil *review* secara bertahap, reaktor Bandung Triga memiliki izin operasi hingga tahun 2027. Hingga saat ini, reaktor Bandung Triga

dioperasikan untuk pengembangan radioisotop dan penelitian. Sedangkan reaktor Kartini memiliki daya thermal 100 kWt pertama kali mencapai kondisi kritis dan beroperasi pada Januari 1979 dan diresmikan pada 1 Maret 1979. Hingga sekarang reaktor ini masih beroperasi, dilengkapi dengan fasilitas bahan murni dan instrumentasi untuk tujuan penelitian, pendidikan, dan latihan. Begitu pula reaktor GA Siwabessy, reaktor ini memiliki data termal sebesar 30.000 kWt, dibangun pada yang tahun 1983. Reaktor ini mencapai tahap kritis pertama pada tanggal Juli 1987, kemudian diresmikan pada tanggal 20 Agustus 1987. Dari ketiganya, Bandung Triga merupakan reactor paling tua, sehingga, direncanakan akan dilakukan proses *decommissioning* lebih dahulu dengan mengikuti prosedur yang berlaku. Terkait peraturan khusus mengenai *decomisioning*, reaktor Kartini dan GA Siwabessy masih dalam tahap pengembangan karena upaya ini menuntut kecermatan.

3. INTEGRASI KELISTRIKAN DAN INFRASTRUKTUR PENDUKUNG

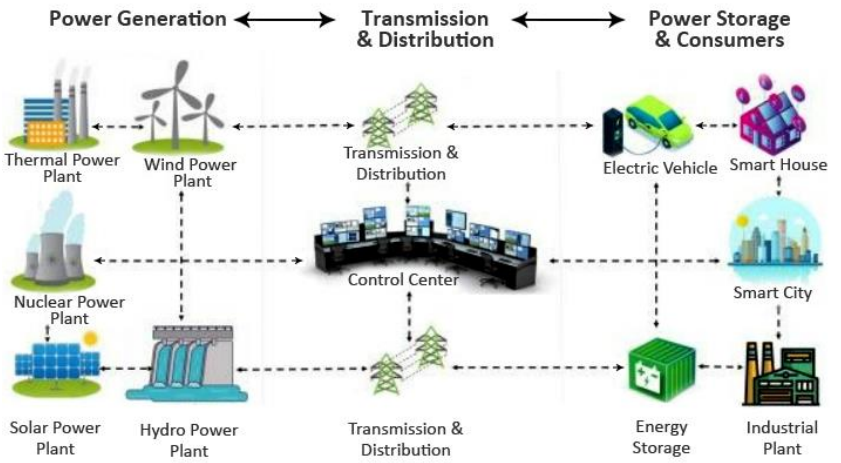
Pemanfaatan energi hijau sebagai penyedia energi listrik semakin meningkat namun tidak semuanya saling terhubung karena terkendala oleh beberapa fakor, misalnya kondisi cuaca yang menyebabkan output menjadi kurang optimal atau kondisi medan yang kurang memungkinkan untuk menjangkau dan menghubungkan suatu pembangkit di suatu lokasi. Guna mengatasi kendala tersebut, diperlukan sebuah sistem yang dapat mengendalikan jaringan kelistrikan yang saling terintegrasi (Forsberg, 2013; Sinaga et al, 2021). Sistem ini dikenal dengan sistem *smart grid* yang dapat memantau

dan mengendalikan jaringan kelistrikan. Saat ini, pemanfaatan EBT dengan sistem *smart grid* semakin meningkat karena dinilai lebih murah. Dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), di tahun 2025 Indonesia menargetkan sebesar 23 % EBT di bauran nasional dan 31 % pada tahun 2050, termasuk nuklir ditargetkan lebih dari 5 % pada tahun 2025 yang termuat dalam Peraturan Presiden No. 5 Tahun 2006 Tentang Kebijakan Energi Nasional. Konsep *smart grid* sangat erat kaitannya dengan teknologi, komunikasi, dan keterlibatan energi terbarukan, sehingga sistem ini sering diistilahkan dengan jaringan modern.

Terdapat perbedaan yang signifikan antara jaringan listrik tradisional dengan jaringan modern. Penggunaan sensor elektronik canggih, kontrol tegangan, serta optimasi berbagai komponen lebih ditekankan pada jaringan modern, sehingga mampu meningkatkan efisiensi. Kelebihan dari sistem smart grid yaitu jaringan dapat dipantau dengan baik, mampu mendeteksi gangguan layanan dan pelanggan yang terdampak lebih cepat, merancang, memperbaiki, dan mengubah ulang (*network reconfiguration*) secara *realtime*, menyediakan pelayanan terbaru, dan mengontrol aliran listrik pada jaringan dengan lebih baik (Moreno-Escobar et al, 2021).

Perkembangan infrastruktur pendukung *smart grid* di Indonesia perlahan mulai diimplementasikan, sebagai contoh *pilot project* yang bernama *Sumba Green Island* di Desa Billa Cenge, Sumba Barat Daya telah mengintegrasikan energi surya, *microhydro*, dan pembangkit diesel. Pusat kontrol atau *master controller photovoltaic* di lokasi tersebut mampu menginterasikannya dengan jaringan listrik milik Perusahaan Listrik Negara (PLN). Meski wilayah tersebut memiliki

topografi berbukit, namun komunikasi data tetap berjalan dengan bantuan satelit *Very Small Aperture Terminal* (VSAT) yang telah dilengkapi sensor untuk membaca parameter kelistrikan (Susanto & Louhenapessy, 2014). Selain itu, *pilot project 'smart community'* telah dicoba di *Karawang Industrial Estate* yang merupakan kerja sama Indonesia dengan Jepang. Konsep ini merupakan sebuah gagasan yang semua aspek di dalamnya saling terhubung antara lingkungan fisik, industri, pemerintah, dan masyarakat.



Gambar 5.2 Smart grid *sebagai jarinngan listrik di masa depan.* (Sumber: Sharad Bhowmick via Circuit Digest, 2022)

Proyek ini bertujuan untuk merespon permintaan melalui kualitas daya listrik dan insentif tarif di kawasan industry (Römer et al., 2017). Selain itu, Indonesia mengembangkan proyek *smart grid* untk jaringan Jawa-Bali yang terdiri dari Cawang Jakarta, Jawa Control Center (JCC) Gandul, P2B, Depok, Cirata Hydro Electric Power Plant (HEPP) Smart Control Project, Jawa Barat, Regional Control Center (RCC) Cigereleng, Jawa Barat, RCC Ungaran, Jawa Tengah, RCC Waru, Jawa Timur, dan RCC Bali. Proyek ini

mengintegrasikan pemanfaatan teknologi dan informasi yaitu *Internet of Things* (IoT) sehingga permintaan dan penawaran dapat tercapai. Selain itu, Indonesia juga memiliki mega target dalam waktu dekat yaitu interkoneksi di Sumatera dan Jamali, dan interkoneksi Kalimantan, Sulawesi, Maluku, Papua, serta antar pulau kecil pada tahun 2024. Rencananya, akan ada sebanyak 6 interkoneksi antar pulau yang akan dipasok melalui pipa bawah laut sesuai draft RUPTL PLN 2021-2030 yaitu Sumatera-Bangka (2021 dan 2022), Sumatera-Bengkalis (2023), Sumatera-Selat Panjang-Tj Balai Karimun (2025), Jawa-Bali (2024), Sumatera-Jawa (dalam kajian ulang), Nusa Tenggara-Paiton (dalam kajian) (Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2021).

Dengan *smart grid* dan interkoneksi jaringan, Indonesia diharapkan mampu merealisasikan kesejahteraan sosial-ekonomi bagi masyarakat dan sebagai solusi yang tepat untuk mencapai NZE. Bila PLTN di Semenanjung Muria, Jepara (Jawa), Bangka (Sumatera), Kalimantan Barat (Kalimantan) dioperasikan, maka interkoneksi jaringan listrik akan semakin baik. Adapun tantangan dalam merealisasikan sistem *smart grid* di Indonesia yang perlu mendapatkan perhatian terutama terkait investasi yang tinggi, komitmen organisasi dan kelembagaan, peraturan standardisasi dan pengaplikasian teknologi. Penerapan sistem *smart grid* dan interkoneksi jaringan di Indonesia akan memberikan manfaat jangka panjang yang signifikan, seperti peningkatan keandalan dan keamanan jaringan listrik, penghematan biaya operasi dan pemeliharaan, serta pengurangan emisi GRK. Dalam jangka panjang, teknologi ini dapat membantu mengurangi

ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan kemandirian energi (Pramudhita et al., 2018; Syahputra, 2022).

4. TRANSISI ENERGI

Sejauh ini, Indonesia tengah mengupayakan percepatan transisi energi seperti yang telah disepakati oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral pada pertemuan *Event Session of the Assembly of the International Renewable Energy Agency* (IRENA) ke-13 di Abu Dhabi (EBTKE-ESDM, 2023). Berikut ini merupakan sejumlah upaya yang menjadi perhatian utama Indonesia untuk mencapai transisi energi nasional.

a. Percepatan dan pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT)

Kebijakan ini tertuang dalam Peraturan Presiden RI Nomor 112 Tahun 2022 Tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik. Tujuan diberlakukannya Peraturan Presiden ini yaitu untuk meningkatkan investasi dan mempercepat target bauran energi terbarukan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Upaya tersebut sejalan dengan pemetaan potensi energi terbarukan diantaranya yaitu Provinsi Papua memiliki potensi surya terbesar di Indonesia mencapai 14.815 MW dan Kalimantan Tengah sebesar 11.685 MW. Provinsi Papua juga menjadi daerah dengan potensi energi angin terbesar di Indonesia yaitu sebesar 46.372 MW dan disusul oleh Provinsi Maluku sebesar 37.749 MW. Hal ini disebabkan kedua daerah tersebut memiliki topografi datar dan terekspos energi angin yang lebih besar daripada daerah lainnya. Selain itu, energi

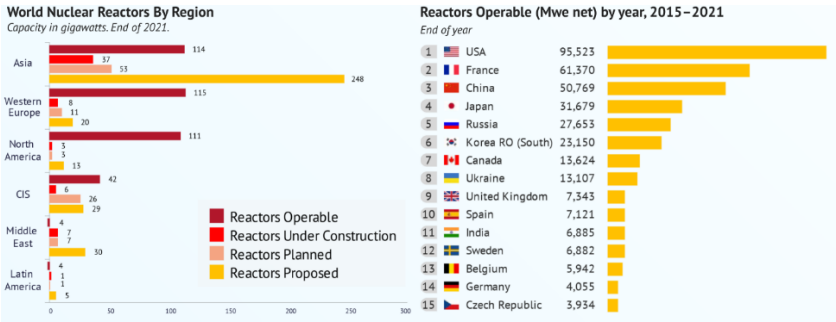
panas bumi dianggap sebagai pilihan alternatif sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia khususnya di Jawa Barat karena memiliki potensi yang paling besar, yaitu 1.859 Mwe. Jenis energi terbarukan di Indonesia yang saat ini sedang diupayakan secara maksimal yaitu PLTA.

Berdasarkan laporan *Master Plan Study for Hydro Power Development in Indonesia* oleh Nippon Koei tahun 2011, potensi energi air di Indonesia sebesar 26.321 MW. Tidak hanya itu, energi biomassa turut dipetakan, diketahui bahwa Provinsi Riau memiliki potensi tenaga biomassa terbesar yang mencapai 3.500 MW dan provinsi Jawa Timur sebesar 3.300 MW (Fitrady et al, 2021). Adapun nuklir saat ini masih menjadi rencana dalam rancangan undang-undang (RUU) tentang Energi Baru dan Terbarukan (EBT) yang nantinya akan ditetapkan *sebagai green energy* bersama sumber-sumber. Rencana ini seharusnya segera dimasukkan dalam regulasi formal kenegaraan sebab nuklir menghasilkan sedikit emisi GRK yang aman bila dikelola dengan baik (Krikorian, 2018).

b. Pengembangan Ekosistem Kendaraan Listrik

Rencana pengembangan kendaraan listrik termuat dalam Peraturan Presiden RI Nomor 55 Tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (*Battery Electric Vehicle*). Beberapa hal yang dibahas di dalamnya yaitu upaya Indonesia untuk mengurangi polusi udara dan gas rumah kaca melalui Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBL). Diperlukan catu daya listrik dan baterai untuk memberikan pasokan listrik pada kendaraan, stasiun pengisian kendaraan listrik umum, dan aturan daur ulang baterai. Indonesia menargetkan penjualan

mobil dan motor listrik setidaknya sebesar 20% penjualan pada tahun 2025. Terkait baterai kendaraan listrik, Indonesia nantinya tidak hanya mengandalkan impor sebab Indonesia memiliki cadangan nikel yang cukup tinggi mencapai 25% dari kebutuhan nikel dunia terutama di Morowali, Sulawesi Tengah. Terbukti dengan dilakukannya peresmian pabrik baterai pada bulan November 2022 di Morowali. Sehingga pada tahun 2025, Indonesia diharapkan mampu memproduksi 14.000 unit baterai (Marciano, 2020). Selain itu, Indonesia belajar dari negara lain yang sudah cukup berhasil mengembangkan ekosistem kendaraan listrik dengan melakukan studi di negara tersebut (Asfani et al., 2020; Veza et al., 2022). Tidak hanya itu, Indonesia menyiapkan sumber daya manusia (SDM) dengan mendirikan politeknik yang berfokus pada teknologi kelistrikan baterai kendaraan listrik.



Gambar 5.3 *Rencana transisi sumber energi listrik, PLTN menjadi pilihan negara-negara Asia.* (Sumber: World Nuclear Association via Knoema, 2021)

c. Penonaktifan Lebih Dini PLTU

Target penonaktifan PLTU juga disebutkan dalam Peraturan Presiden RI Nomor 112 Tahun 2022 Tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan Untuk

Penyediaan Tenaga Listrik. Pembangunan PLTU baru dilarang kecuali bila pembangkit tersebut telah ditetapkan untuk memenuhi penyediaan tenaga listrik sebelum diberlakukannya peraturan terbaru. Selain itu, PLTU harus memenuhi sejumlah persyaratan 1) PLTU masuk dalam proyek strategis nasional yang memberikan kontribusi besar terhadap penciptaan lapangan kerja dan mampu meningkatkan pertumbuhan ekonomi nasional. 2) PLTU diharuskan mampu mengurangi emisi gas rumah kaca setidaknya 30% dalam waktu 10 tahun dan hanya diizinkan beroperasi hingga tahun 2050. Alasan utama penonaktifan PLTU karena pembangkit ini masih menggunakan batu bara, minyak, gas atau campuran ketiganya sebagai bahan bakar yang dinilai tidak ramah lingkungan. Meski PLTU memiliki fasilitas pengolahan limbah, namun tidak semua output parameter kualitas lingkungan air maupun udara seperti TSS, SST, chlorophyll-A, PM_{10}, CO, dan SO_2 memenuhi aturan baku mutu serta indeks standar pencemar udara. Hal ini terindikasi dari adanya laporan masyarakat sekitar PLTU yang menyaksikan perubahan lingkungan saat beroperasi, sehingga adanya penurunan daya dukung lingkungan yang cukup signifikan (Widiawaty et al, 2020; Dede et al, 2020).

5. ALIH TEKNOLOGI DAN KESIAPAN INDONESIA

Alih teknologi adalah proses transfer teknologi dari suatu negara ke negara lain. Di Indonesia, proses ini salah satunya digunakan untuk mempersiapkan pembangunan PLTN demi mencapai NZE (Inuma & Tsukahara, 2015). Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa pembangunan PLTN di Indonesia menggunakan teknologi terkini dan bahwa sumber daya

manusia di Indonesia memiliki keterampilan yang diperlukan untuk membangun dan mengoperasikan PLTN. Alih teknologi juga membantu memastikan bahwa Indonesia memenuhi semua persyaratan yang diperlukan untuk membangun PLTN dengan aman, seperti standar teknis, ketentuan operasional, serta standar keselamatan dan keamanan. Dengan proses ini, pemerintah Indonesia dapat memastikan bahwa semua proses terkait dengan pembangunan PLTN dilakukan sesuai dengan standar internasional, mulai dari perencanaan hingga operasional.

Diperlukan rencana yang matang untuk mendukung alih teknologi dengan memberikan peluang pada industri nasional dengan memberikan fasilitas berupa pendidikan, pelatihan, dan dana yang digunakan untuk uji coba dalam menciptakan teknologi yang dibuat secara mandiri. Proses alih teknologi bukan sekadar pengalihan dokumen teknis namun sebuah proses pengamatan hingga pembuatan. Selain itu, penting untuk dilakukan analisis terkait seberapa jauh penggunaan komponen yang diproduksi di dalam negeri. Analisis ini sangat penting untuk meningkatkan industri manufaktur lokal guna mendukung pasokan komponen. Berkaca dari beberapa komponen EBT seperti pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA) yang mayoritas sudah diproduksi secara domestik, kecuali untuk turbin dan generator yang didatangkan dari luar negeri. Pembangunan PLTN optimis bisa berjalan sesuai rencana dengan tidak hanya mengandalkan komponen impor dan bisa mengembangkan industri kelistrikan di dalam negeri. Belajar dari keberhasilan negara lain seperti Korea Selatan yang menerapkan strategi

alih teknologi dalam mengoperasikan PLTN di negaranya (Sriyana & Nurlaila, 2003).

Alih teknologi juga memiliki tantangan tersendiri, seperti kemungkinan terjadinya kegagalan transfer teknologi karena kesenjangan teknologi antara negara pemberi dan penerima teknologi. Proses alih teknologi nuklir harus dilakukan dengan hati-hati dan melalui kerja sama yang saling menguntungkan antara pemerintah dan pihak-pihak swasta di kedua negara yang terlibat (Johari et al., 2022). Selain itu, pemerintah Indonesia juga harus memastikan bahwa transfer teknologi dilakukan secara transparan dan terbuka, serta memastikan bahwa keamanan dan keselamatan PLTN dijaga dengan baik. Indonesia saat ini sudah siap karena mampu memproduksi beberapa komponen penting untuk PLTN, contohnya PT Siemen Indonesia, sekarang menjadi PT Barata Indonesia, pernah membuat dan menyediakan kondenser untuk PLTN Olkiluoto unit 3 di Finlandia dengan kapasitas daya 1.600 MWe. Selain itu, PT Siemen Indonesia pernah mengekspor *inner casing turbine* untuk PLTN Susquehanna (Amerika Serikat) dan PLTN Forsmark (Swedia) (BRIN, 2022).

Gambar 5.4 *Tiga perguruan tinggi yang menyediakan program studi ketenaganukliran.* (Sumber: Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia, UGM, dan ITM, 2023)

Dari segi sumber daya manusia, Indonesia memerlukan individu terampil untuk pengembangan energi nuklir yang dihasilkan dari pendidikan di jenjang menengah dan tinggi. Pada jenjang pendidikan tinggi vokasi, BATAN telah merintis dan mengelola Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir (STTN). Pemerintah telah mengubah karakteristik STTN menjadi bentuk perguruan tinggi baru yakni Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia. Saat ini, terdapat dua perguruan tinggi yang memiliki program studi di bidang nuklir, yaitu Universitas Gadjah Mada (UGM) di Yogyakarta dan Institut Teknologi Bandung (ITB) di Bandung. UGM memiliki Program Studi Teknik Nuklir di bawah Fakultas Teknik. Program studi ini memiliki fokus pada bidang energi nuklir, pengolahan bahan bakar nuklir, dan pengembangan teknologi nuklir untuk kepentingan kesehatan. Selain itu, UGM juga memiliki Pusat Studi Energi Nuklir (PSEN) yang berfungsi sebagai pusat pengembangan ilmu dan teknologi nuklir.

Sementara itu, ITB memiliki Program Studi Teknik Nuklir di bawah Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara. Program studi ini memiliki fokus pada pengembangan teknologi nuklir yang berkaitan dengan bidang kelistrikan, industri, dan kesehatan. ITB juga memiliki Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB) yang merupakan pusat pengembangan teknologi nuklir di kampus ITB. Di samping ketiga kampus di atas, kajian perihal nuklir bisa ditempuh oleh mahasiswa pada program-program studi rumpun ilmu-ilmu alam seperti Fisika dan Kimia yang telah banyak eksis di aneka perguruan tinggi (Putero et al., 2013). Aneka upaya ini merupakan bentuk realisasi untuk mencapai teknologi nuklir yang telah dicanangkan sejak era Presiden Soekarno (Cornejo, 2000).

Kesiapan SDM Indonesia untuk alih teknologi nuklir terlihat dari pembentukan Batan Tekno (Persero) yang didirikan pada tahun 1996 sebagai anak usaha dari BATAN. Batan Tekno berfokus pada pengembangan dan pemanfaatan radioisotop hingga radiasi nuklir untuk berbagai keperluan seperti kesehatan, industri, pertanian, dan lingkungan (BATAN, 2018). Perusahaan ini diwacanakan membangun reaktor nuklir pengayaan uranium sistem (tingkat) rendah, proses pengayaan yang masih jarang karena umumnya teknologi nuklir berfokus pada pengayaan tingkat tinggi (Falk & Bodman, 2006; Hoedl & Updegraff, 2015; Lee et al., 2016). Pada tahun 2017, Batan Tekno (Persero) berganti nama menjadi PT Industri Nuklir Indonesia yang terus berperan untuk memasarkan produk hasil teknologi nuklir hingga ke mancanegara. Radio isotop berguna menangani kanker dan penyempitan pembuluh darah, produk ini telah diekspor ke Malaysia, Vietnam, Filipina, dan Bangladesh.

الإدارة العالمية
N U
نهضة العلماء
١٣٤٤
1926

BAB_6

PENUTUP

Energi nuklir dapat menjadi solusi dalam mencapai tujuan NZE di masa depan. Mempelajari dasar-dasar reaksi nuklir dan berbagai pengaplikasiannya dalam beragam bidang, terutama energi, merupakan langkah tepat untuk menyongsong kesiapan infrastruktur untuk pembangunan PLTN di Indonesia. Pemanfaatan nuklir sebagai energi hijau dapat menjadi jawaban atas tantangan perubahan iklim dan pengurangan emisi karbon. Dari buku ini, pengalaman negara-negara lain dan mengembangkan energi nuklir nasional merupakan pengetahuan berharga untuk mengurangi jejak karbon sektor energi. Selain itu, konsep FOLU Net Sink juga dapat diintegrasikan dalam pembangunan rendah karbon yang bertujuan menciptakan kesetimbangan antara emisi karbon dan penyerapan karbon di dalam tanah melalui aneka tipe penggunaan lahan, yang mana infrastruktur energi berperan utama.

Pengembangan energi nuklir di Indonesia sudah dimulai sejak awal tahun 1950-an dengan fokus utama pada pengembangan teknologi nuklir untuk keperluan medis, pertanian, dan industri. Kemudian, Indonesia membangun PLTN pertama pada tahun 1964 dengan bantuan dari Uni Soviet (Rusia). Sejak saat itu, Indonesia mengembangkan PLTN lainnya di beberapa lokasi. Pengembangan energi nuklir di Indonesia masih menghadapi beberapa tantangan, seperti ketergantungan pada teknologi dan bahan bakar dari negara lain, masalah keamanan dan risiko lingkungan, masalah sosial dan politik, dan sebagainya. Meski demikian,

pengembangan energi nuklir di Indonesia juga mengalami beberapa kemajuan dari segi penentuan tapak dan pengembangan teknologi nuklir untuk beragam keperluan. Penting bagi Indonesia untuk terus mengembangkan teknologi nuklir secara mandiri dan memperkuat kerja sama internasional dalam bidang energi nuklir. Selain itu, penting untuk meningkatkan pemahaman masyarakat tentang energi nuklir dan memperkuat regulasi dan pengawasan untuk memastikan penggunaan energi nuklir dilakukan dengan aman dan bertanggung jawab.

Keberadaan PLTN di Indonesia dapat menjadi pilihan utama dalam mencapai tujuan NZE. Untuk mencapai tujuan mulia ini, strategi dan implementasi NZE perlu diterapkan dengan hati-hati, mengatasi tantangan yang muncul seiring dengan waktu. Seiring dengan kesiapan infrastruktur pengembangan energi atom, pemerintah dan pihak-pihak berkepentingan perlu merumuskan lokasi tapak potensial PLTN, *life cycle management*, serta integrasi kelistrikan yang sangat bergantung pada kesiapan sarana dan prasarana pendukung. Transisi energi menjadi satu bagian penting dari pembangunan PLTN dan usaha untuk memenuhi kebutuhan listrik secara berkelanjutan. Meski begitu, PLTN sebagai pilihan untuk energi hijau tetap harus ditinjau dengan saksama. Kita tidak bisa melupakan bahwa penggunaan energi nuklir juga memiliki risiko yang perlu dipertimbangkan dengan serius. Pengelolaan risiko yang efektif dan penerapan standar keselamatan yang tinggi dalam pembangunan dan operasional PLTN merupakan kebutuhan fundamental.

Dalam menghadapi tantangan perubahan iklim, pengembangan energi hijau dan tujuan pembangunan

berkelanjutan menjadi semakin penting. Energi nuklir memiliki potensi untuk memberikan kontribusi signifikan dalam mencapai tujuan tersebut, terutama jika ditangani dengan bijak dan hati-hati. Memahami potensi energi nuklir dan cara pemanfaatannya secara bijak merupakan langkah untuk masa depan yang lebih baik. Kita harus terus memperhatikan dan mengembangkan teknologi yang lebih aman dan efektif dalam penggunaan energi nuklir. Selain itu, kesadaran akan perlunya pengelolaan limbah radioaktif yang tepat dan penghapusan limbah yang aman menjadi hal yang sangat penting. Di masa depan, penggunaan energi nuklir dapat menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan energi dunia yang semakin meningkat dan untuk mengurangi emisi karbon. Upaya memperkuat kerja sama internasional dalam pengembangan dan penerapan teknologi nuklir sangat diperlukan untuk memastikan keselamatan dan keamanan penggunaan energi nuklir. Dengan demikian, upaya untuk mencapai tujuan bersama untuk mempromosikan penggunaan energi nuklir yang bertanggung jawab, berkelanjutan, dan aman dapat segera terwujud.

Kita berharap bahwa buku ini memberikan pemahaman yang lebih luas tentang pembangkit listrik tenaga nuklir dan manfaat pemanfaatan nuklir sebagai energi hijau dalam mencapai tujuan NZE. Informasi dari buku ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang berguna bagi para pembaca dalam membuat keputusan yang lebih tepat mengenai opsi energi di masa depan. Upaya untuk memperkuat pemahaman tentang energi nuklir dan mendorong pengembangan teknologi yang lebih aman dan efektif merupakan kewajiban

bersama, agar proses perencanaan, operasional, hingga evaluasi bisa terus dipantau guna mencapai tujuan NZE.

DAFTAR PUSTAKA

Alamsyah, R. (2022). Decommissioning insight in NPP design: A case study of Indonesia. AIP Conference Proceedings, 2525, 090001.

Antariksawan, A. R. (2016). Nuclear security culture and Batan's assessment: Batan's experience. International Journal of Nuclear Security, 2(2), 4.

Aoto, K., Dufour, P., Hongyi, Y., Glatz, J. P., Kim, Y. I., Ashurko, Y., ... & Uto, N. (2014). A summary of sodium-cooled fast reactor development. Progress in Nuclear Energy, 77, 247-265.

Aprilianto, R. A., & Ariefianto, R. M. (2021). Peluang dan tantangan menuju net zero emission (NZE) menggunakan variable renewable energy (VRE) pada sistem ketenagalistrikan di Indonesia. Jurnal Paradigma, 2(2), 1-13.

Aras, E. M., & Diaconeasa, M. A. (2021). A critical look at the need for performing multi-hazard probabilistic risk assessment for nuclear power plants. Eng, 2(4), 454-467.

Arostegui, D. A., & Holt, M. (2019). Advanced nuclear reactors: technology overview and current issues. Congressional Research Service Report for Congress, Washington, DC, Report (No. R45706).

Asfani, D. A., Negara, I. M. Y., Nugraha, Y. U., Yuniarto, M. N., Wikarta, A., Sidharta, I., & Mukhlisin, A. (2020). Electric vehicle research in indonesia: A road map, road tests, and

research challenges. IEEE Electrification Magazine, 8(2), 44-51.

Ashnani, M. H. M., Miremadi, T., Johari, A., & Danekar, A. (2015). Environmental impact of alternative fuels and vehicle technologies: a life cycle assessment perspective. Procedia Environmental Sciences, 30, 205-210.

Bagher, A. M., Nahid, A., Mohsen, M., & Vahid, M. (2014). Nuclear techniques in agriculture and genetics. American Journal of Bioscience, 2(3), 102-105.

Barbat, J. D., & Liberge, R. (2013). Nuclear Fuel Cycle: Which strategy to support a sustainable growth for nuclear energy?. Energy Procedia, 39, 69-80.

BATAN. (2018). Laporan Kinerja BATAN Tahun 2017. Jakarta: Biro Perencanaan BATAN.

Beck, J. M., & Pincock, L. F. (2011). High temperature gas-cooled reactors lessons learned applicable to the next generation nuclear plant. Idaho: Idaho National Lab.

Bennett, G. L. (1989). A look at the Soviet space nuclear power program. Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. IEEE.

Bernard, P. (2007). French experiences and perspectives on plutonium recycling in the existing power fleet. Progress in Nuclear Energy, 49(8), 583-588.

Bildirici, M. E. (2020). Environmental pollution, hydropower and nuclear energy generation before and after catastrophe: Bathtub-Weibull curve and MS-VECM methods. Natural Resources Forum, 44(4), 289-310.

Black, M. S., Parry, I., Roaf, M. J., & Zhunussova, K. (2021). Not yet on track to net zero: The urgent need for greater ambition and policy action to achieve Paris temperature goals. International Monetary Fund.

Bomboni, E., Cerullo, N., Lomonaco, G., & Romanello, V. (2008). A critical review of the recent improvements in minimizing nuclear waste by innovative gas-cooled reactors. Science and Technology of Nuclear Installations, 2008, 265430.

BRIN. (2022). Pembangunan PLTN dalam Roadmap NZE: Rasionalisasi. Jakarta Pusat: Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Brook, B. W., Alonso, A., Meneley, D. A., Misak, J., Blees, T., & van Erp, J. B. (2014). Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. Sustainable Materials and Technologies, 1, 8-16.

Budiarso, A. (2019). Kebijakan pembiayaan perubahan iklim: Suatu pengantar. Bogor: IPB Press.

Buongiorno, J., Corradini, M., Parsons, J., & Petti, D. (2019). Nuclear energy in a carbon-constrained world: Big challenges and big opportunities. IEEE Power and Energy Magazine, 17(2), 69-77.

Cai, J., Renault, C., & Gou, J. (2014). Supercritical water-cooled reactors. Science and Technology of Nuclear Installations, 2014, 548672.

Cardis, E., & Hatch, M. (2011). The Chernobyl accident – an epidemiological perspective. Clinical Oncology, 23(4), 251-260.

Chaki, A. (2014). Geological, geophysical investigations and seismotectonic analysis with reference to selection of site for nuclear power plants: a review. Exploration and Research for Atomic Minerals, 24(special issue), 9-15.

Chaplin, R. (2015). Introduction to nuclear reactors. The Essential CANDU-A textbook on the CANDU Nuclear Power Plant Technology. Ontario: UNENE.

Chapungu, L., Nhamo, G., Chikodzi, D., & Maoela, M. A. (2022). BRICS and the Race to Net-Zero Emissions by 2050: Is COVID-19 a Barrier or an Opportunity?. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 8(4), 172.

Cheon, J. H., Lee, S. C., Kim, C. L., & Park, H. G. (2018). Feasibility study on recycling of concrete waste from NPP decommissioning through literature review. Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, 6(2), 115-122.

Cherp, A., Vinichenko, V., Jewell, J., Suzuki, M., & Antal, M. (2017). Comparing electricity transitions: A historical analysis of nuclear, wind and solar power in Germany and Japan. Energy Policy, 101, 612-628.

Cho, I., Oh, S., Kim, S., Ardin, F., & Heo, E. (2021). Determinants of nuclear power expansion in Indonesia. Nuclear Engineering and Technology, 53(1), 314-321.

Choudary, S. (2020). Pakistan's nuclear security regime: Potential threats, risk assessment and risk management for safe future. NDU Journal, 34, 115-130.

Clemens, W. C. (2010). North Korea's Quest for Nuclear Weapons: new historical evidence. Journal of East Asian Studies, 10(1), 127-154.

Cochran, T. B. (2019). Making the Russian Bomb: From Stalin to Yeltsin. Routledge.

Cong, J. (2022). Advantages and disadvantages of energy from fossil fuels. Global Science Research Journals, 1(2): 1-2.

Cornejo, R. M. (2000). When Sukarno sought the bomb: Indonesian nuclear aspirations in the mid-1960s. The Nonproliferation Review, 7(2), 31-43.

Das, A., Saini, V., Parikh, K., Parikh, J., Ghosh, P., & Tot, M. (2023). Pathways to net zero emissions for the Indian power sector. Energy Strategy Reviews, 45, 101042.

Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I. L., ... & Caldeira, K. (2018). Net-zero emissions energy systems. Science, 360(6396), eaas9793.

Dede, M., Asdak, C., & Setiawan, I. (2022b). Spatial-ecological approach in Cirebon's peri-urban regionalization. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1089, 012080.

Dede, M., Sunardi, S., Lam, K. C., & Withaningsih, S. (2023a). Relationship between landscape and river ecosystem services. Global Journal of Environmental Science and Management, 9(3), 637-652.

Dede, M., Susiati, H., Widiawaty, M. A., Lam, K. C., Aiyub, K., & Asnawi, N. H. (2023b). Multivariate analysis and modeling of shoreline changes using geospatial data. Geocarto International, 38(1), 2159070.

Dede, M., Wibowo, S. B., Prasetyo, Y., Nurani, I. W., Setyowati, P. B., & Sunardi, S. (2022a). Water resources carrying capacity before and after volcanic eruption. Global Journal of Environmental Science and Management, 8(4), 473-484.

Dede, M., Widiawaty, M. A., Nurhanifah, N., Ismail, A., Artati, A. R. P., Ati, A., & Ramadhan, Y. R. (2020). Estimasi perubahan kualitas udara berbasis citra satelit penginderaan jauh di sekitar PLTU Cirebon. Jambura Geoscience Review, 2(2), 78-87.

Dede, M., Widiawaty, M. A., Pramulatsih, G. P., Ismail, A., Ati, A., & Murtianto, H. (2019). Integration of participatory mapping, crowdsourcing and geographic information system in flood disaster management (case study Ciledug Lor, Cirebon). Journal of Information Technology and Its Utilization, 2(2), 44-47.

Del Cul, G. D., Spencer, B. B., & Collins, E. D. (2007). A new paradigm: Near-complete recycling of spent fuel—a path to sustainable nuclear energy. Proceedings of Global 2007 Conference on Advanced Nuclear Fuel Cycles and Systems. IAEA.

Delbeke, J., Runge-Metzger, A., Slingenberg, Y., & Werksman, J. (2019). The paris agreement. Towards a climate-neutral Europe. Routledge.

Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan (2021). Sinkronisasi proses perizinan kabel listrik bawah laut dengan Kepmen Kelautan dan Perikanan No 14 Tahun 2021. Sosialisasi Kepmen KP Nomor 14 Tahun 2021 tentang Alur Pipa dan/atau Kabel Bawah Laut.

Dittmar, M. (2012). Nuclear energy: Status and future limitations. Energy, 37(1), 35-40.

EBTKE-ESDM. (2023). Hadiri IRENA 13th Session Assembly, Menteri ESDM tekankan keberlanjutan transisi energi global. Retrieved from https://ebtke.esdm.go.id/post/2023/01/16/3400/hadiri.irena.13th.session.assembly.menteri.esdm.tekankan.keberlanjutan.transisi.energi.global?lang=en.

Falk, J., & Bodman, R. (2006). Uranium enrichment. Briefing Paper (Fact Sheet 7). Energy Science.

Falkner, R. (2016). The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. International Affairs, 92(5), 1107-1125.

Fitrady, A., Widyaparaga, D. A., Putranto, B., Handika, I., …, & Nugrahaningsih, F. (2021). Model bisnis untuk memperkuat peran pemerintah daerah dalam pemanfaatan potensi energi terbarukan di Indonesia. Yogyakarta: Pusat Studi Energi UGM.

Forsberg, C. (2013). Hybrid systems to address seasonal mismatches between electricity production and demand in nuclear renewable electrical grids. Energy Policy, 62, 333-341.

Forsberg, C. W. (2009). Sustainability by combining nuclear, fossil, and renewable energy sources. Progress in Nuclear energy, 51(1), 192-200.

Fragkos, P., van Soest, H. L., Schaeffer, R., Reedman, L., Köberle, A. C., Macaluso, N., ... & Iyer, G. (2021). Energy system transitions and low-carbon pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States. Energy, 216, 119385.

Friedlingstein, P., O'sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., ... & Zaehle, S. (2020). Global carbon budget 2020. Earth System Science Data, 12(4), 3269-3340.

Fütterer, M. A., Fu, L., Sink, C., de Groot, S., Pouchon, M., Kim, Y. W., ... & Tachibana, Y. (2014). Status of the very high temperature reactor system. Progress in Nuclear Energy, 77, 266-281.

Ganguly, S., & Kapur, S. P. (2010). India, Pakistan, and the bomb: debating nuclear stability in South Asia. Columbia University Press.

Gani, A. (2021). Fossil fuel energy and environmental performance in an extended STIRPAT model. Journal of Cleaner Production, 297, 126526.

Gatti, F., Lopez-Caballero, F., Clouteau, D., & Paolucci, R. (2018). On the effect of the 3-D regional geology on the seismic design of critical structures: the case of the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Plant. Geophysical Journal International, 213(2), 1073-1092.

Ginoga, K., Djaenudin, D., & Dharmawan, I. W. S. (2022). Peran standar instrumen ketahanan bencana dan perubahan iklim di era Net Sink FOLU 2030 paska Undang Undang Cipta Kerja. Standar: Better Standard Better Living, 1(1), 5-12.

Goldberg, S., & Rosner, R. (2011). Nuclear reactors: Generation to generation. Cambridge: American Academy of Arts and Sciences.

Goodman, R., & Herold, M. (2014). Why maintaining tropical forests is essential and urgent for a stable climate. Center for Global Development Working Paper, 385.

Gunawan, Y., & Andriana, R. A. (2019). The proliferation of nuclear weapons in North Korea: International law perspective. Jurnal Cendekia Hukum, 5(1), 32-48.

Hakam, D. F., Nugraha, H., Wicaksono, A., Rahadi, R. A., & Kanugrahan, S. P. (2022). Mega conversion from LPG to induction stove to achieve Indonesia's clean energy transition. Energy Strategy Reviews, 41, 100856.

Hakim, A. A. R. (2020). Safety analysis of the irradiation of Tellurium (Te) target in GA Siwabessy Reactor. Journal of Physics: Conference Series, 1436, 1, 012005.

Hamilton, J. D. (2013). Historical oil shocks. Routledge Handbook of Major Events in Economic History. London: Routledge.

Hartoyo, A. P. P., Khairunnisa, S., Pamoengkas, P., Solikhin, A., Supriyanto, S., Siregar, I. Z., ... & Istomo, I. (2022). Estimating carbon stocks of three traditional agroforestry systems and their relationships with tree diversity and stand density. Biodiversitas Journal of Biological Diversity, 23(12).

Hastomo, W., Aini, N., Karno, A. S. B., & Rere, L. R. (2022). Metode Pembelajaran Mesin untuk Memprediksi Emisi Manure Management. Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, 11(2), 131-139.

Heidari, N., & Pearce, J. M. (2016). A review of greenhouse gas emission liabilities as the value of renewable energy for mitigating lawsuits for climate change related damages. Renewable And Sustainable Energy Reviews, 55, 899-908.

Hindarto, D. E., Samyanugraha, A., & Natalia, D. (2018). #Pasarkarbon: Pengantar pasar karbon untuk perubahan iklim. Jakarta: Parnership for Market Readiness (PMR).

Hoedl, S. A., & Updegraff, W. D. (2015). The production of medical isotopes without nuclear reactors or uranium enrichment. Science & Global Security, 23(2), 121-153.

Holechek, J. L., Geli, H. M., Sawalhah, M. N., & Valdez, R. (2022). A global assessment: can renewable energy replace fossil fuels by 2050?. Sustainability, 14(8), 4792.

Hong, S., Bradshaw, C. J., & Brook, B. W. (2014). Nuclear power can reduce emissions and maintain a strong economy: Rating Australia's optimal future electricity-generation mix by technologies and policies. Applied Energy, 136, 712-725.

Human, S. (2011). Riset dan pengembangan sorgum dan gandum untuk ketahanan pangan. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN).

IAEA. (2004). Management of life cycle and ageing at nuclear power plants: Improved I&C maintenance. Technical Working Group on Nuclear Power Plant Control and Instrumentation (IAEA-TECDOC-1402). International Atomic Energy Agency

IAEA. (2005). Nuclear power reactors in the world. Vienna: International Atomic Energy Agency

IAEA. (2009). Regulations for the safe transport of radioactive material. Vienna: International Atomic Energy Agency.

IAEA. (2015a). Nuclear forensics in support of investigations. IAEA Nuclear Security Series 2G. Vienna: International Atomic Energy Agency.

IAEA. (2015b). Module IV: Design of a nuclear reactor. Vienna: International Atomic Energy Agency.

IAEA. (2018). High-Temperature Gas-Cooled Reactors: Overview and Status. Vienna: International Atomic Energy Agency.

IAEA. (2020). Nuclear technology review. IAEA Australia.

Ichihara, Y., Nakamura, N., Moritani, H., Choi, B., & Nishida, A. (2021). 3D FEM Soil-Structure Interaction Analysis for Kashiwazaki–Kariwa Nuclear Power Plant Considering Soil Separation and Sliding. Frontiers in Built Environment, 7, 676408.

Ichikawa, H. (2016). Obninsk, 1955: The World's first nuclear power plant and" the atomic diplomacy" by Soviet scientists. Historia Scientiarum, Second Series: International Journal of the History of Science Society of Japan, 26(1), 25-41.

Inuma, M., & Tsukahara, T. (2015). Japan's "Nuclear Village" Beyond the Border: The Japan-Indonesia Network of Nuclear Engineering. East Asian Science, Technology and Society: An International Journal, 9(3), 295-310.

Jha, M. K. (2010). Natural and anthropogenic disasters: An overview. Natural and anthropogenic disasters: vulnerability, preparedness and mitigation, 1-16.

Johari, J. M., Rahmadi, G., Sungkono, Langenati, R., Yulianto, T., Dewayatna, W., ... & Suryaman, G. K. (2022). Approach toward strengthening strategy for nuclear fuel development in Indonesia. AIP Conference Proceedings, 2501, 020018.

Karakosta, C., Pappas, C., Marinakis, V., & Psarras, J. (2013). Renewable energy and nuclear power towards sustainable development: Characteristics and prospects. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 22, 187-197.

Kelleher, K., Currivan, L., Organo, C., & Olbert, I. (2012). Assessment of the impact on the Irish public and marine environment arising from liquid discharges from potential new build power plants in the United Kingdom. IRPA.

Khairunnisa, N. F. (2017). Perkembangan pengaturan teknologi nuklir sebagai energi untuk pembangunan berkelanjutan. MA Thesis, Universitas Hasanuddin, Makassar.

Kharecha, P. A., & Hansen, J. E. (2013). Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power. Environmental science & technology, 47(9), 4889-4895.

Kharfi, F. (2013). Principles and applications of nuclear medical imaging: A survey on recent developments. Imaging and Radioanalytical Techniques in Interdisciplinary Research – Fundamentals and Cutting-Edge Applications. London: Intechopen.

Kingston, J. (2012). Natural disaster and nuclear crisis in Japan. London: Roudedge.

KLHK. (2022). Indonesia's FOLU Net Sink 2030. Retrieved from http://pustandpi.or.id/wp-content/uploads/2022/09/PAPARAN-4N_4.-Sesdit-PKTL.pdf.

Koltun, P., Tsykalo, A., & Novozhilov, V. (2018). Life cycle assessment of the new generation GT-MHR nuclear power plant. Energies, 11(12), 3452.

Králik, J. (2017). Risk Assessment of NPP safety in case of emergency situations on technology. Recent Improvements of Power Plants Management and Technology. London: Intechopen.

Kramer-Marek, G., & Capala, J. (2012). The role of nuclear medicine in modern therapy of cancer. Tumor Biology, 33 (3), 629-640.

Krikorian, S. (2018). Nuclear Power beyond electricity: Towards greater efficiency in energy production and water management. Retrieved from https://www.iaea .org/newscenter/news/nuclear-power-beyond-electricity-towards-greater-efficiency-in-energy-production-and-water-management.

Kwak, J. K. (2016). Systematic approach to training for the design of nuclear power plant decommissioning training in South Korea. Journal of Physical Science and Application, 6(5), 14-20.

Kyne, D., & Harris, J. T. (2015). A longitudinal study of human exposure to potential nuclear power plant risk. International Journal of Disaster Risk Science, 6, 399-414.

Langer, J., Quist, J., & Blok, K. (2021). Review of renewable energy potentials in Indonesia and their contribution to a 100% renewable electricity system. Energies, 14(21), 7033.

Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J., Abernethy, S., Andrew, R. M., ... & Peters, G. P. (2020). Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement. Nature climate change, 10(7), 647-653.

Lee, S. K., Beyer, G. J., & Lee, J. S. (2016). Development of industrial-scale fission 99Mo production process using low enriched uranium target. Nuclear Engineering and Technology, 48(3), 613-623.

Lenzen, M. (2008). Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. Energy conversion and management, 49(8), 2178-2199.

Lestari, N. S., & Noor'an, R. F. (2022). Carbon sequestration potential of rubber plantation in East Kalimantan. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1109, 1, 012102.

Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., ... & Schellnhuber, H. J. (2020). Near-real-time monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. Nature communications, 11(1), 5172.

Lu, L. C., Chiu, S. Y., Chiu, Y. H., & Chang, T. H. (2022). Sustainability efficiency of climate change and global disasters based on greenhouse gas emissions from the parallel production sectors–A modified dynamic parallel three-stage network DEA model. Journal of Environmental Management, 317, 115401.

Malerba, L., Al Mazouzi, A., Bertolus, M., Cologna, M., Efsing, P., Jianu, A., ... & Tarantino, M. (2022). Materials for sustainable nuclear energy: a European strategic research and innovation agenda for all reactor generations. Energies, 15(5), 1845.

Maradin, D. (2021). Advantages and disadvantages of renewable energy sources utilization. International Journal of Energy Economics and Policy, 11 (3), 176-183.

Marciano, I. (2020). Mengembangkan ekosistem kendaraan listrik: pelajaran dari pengalaman Amerika Serikat, Norwegia, dan Cina. Institute for Essential Services Reform.

Matemilola, S., & Salami, H. A. (2020). Net zero emission. Encyclopedia of sustainable management. Springer-Nature.

Matemilola, S., & Salami, H. A. (2020). Net zero emission. Encyclopedia of sustainable management. Springer.

Matsumoto, K. I. (2019). Climate change impacts on socioeconomic activities through labor productivity changes considering interactions between socioeconomic and climate systems. Journal of Cleaner Production, 216, 528-541.

Millot, A., Krook-Riekkola, A., & Maïzi, N. (2020). Guiding the future energy transition to net-zero emissions: Lessons

from exploring the differences between France and Sweden. Energy Policy, 139, 111358.

Mochizuki, M., Singh, R., Nguyen, T., Saito, Y., & Nguyen, T. (2012). An emergency core cooling system (ECCS) for nuclear power reactor using passive loop heat pipe. Journal of Japan Institute of Electronics Packaging, 15(3), 180-184

Mohan, D. (2015). The Macroeconomics of Oil Prices and Economic Shocks: Lessons from the 1970s. Risk Governance and Control Financial Markets & Institutions, 5(4), 80-90.

Moreno-Escobar, J. J., Morales Matamoros, O., Tejeida Padilla, R., Lina Reyes, I., & Quintana Espinosa, H. (2021). A comprehensive review on smart grids: Challenges and opportunities. Sensors, 21(21), 6978.

Mrozowska, S. (2014). Social communication in nuclear projects in France. European Journal Transformation Studies, 2(2),

Nababan, N. (2008). Decommissioning plan for research reactors in Indonesia. The IAEA 3rd Technical Meeting on the Research Reactor Decommissioning Demonstration Project (R2D2P), Manila, Philippines, 15-19 September 2008.

Nakazawa, T., Satoh, K., Trencher, G., Tatsumi, T., & Hasegawa, K. (2023). Net-zero carbon declarations by Japanese local governments: What caused the domino-like diffusion?. Review of Policy Research, 12544.

Nakhle, C. (2018). Russia's energy diplomacy in the Middle East. Russia's return to the Middle East: Building sandcastles, 29-35.

NASA. (2022). NASA utilization of space nuclear systems for robotic and human exploration missions: response to EO 13972: Promoting small nuclear reactors for national defense and space exploration. Washington: NASA Headquarters.

Nasouri, M., & Delgarm, N. (2022). Bushehr Nuclear Power Plants (BNPPs) and the perspective of sustainable energy development in Iran. Progress in Nuclear Energy, 147, 104179.

Nogueira, L. A. H., & Capaz, R. S. (2013). Biofuels in Brazil: Evolution, achievements and perspectives on food security. Global Food Security, 2(2), 117-125.

Nuclear Energy Institute. (2022). Boiling Water Reactors (BWRs). Retrieved from https://www.nei.org/resources/fact-sheets/boiling-water-reactors-bwrs

Nurbayani, S., Dede, M., Utami, N. F., & Widiawaty, M. A. (2023). The implementation of COVID-19 health protocol: A higher students' perspective. Geografia-Malaysian Journal of Society and Space, 19(1), 190-200.

Nurokhim, N., & Sumarbagiono, R. (2013). Analisis sistem komputer untuk manajemen dan estimasi biaya dekomisioning PLTN. Buletin Limbah, 9(2).

Onat, N. C., & Kucukvar, M. (2020). Carbon footprint of construction industry: A global review and supply chain analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 124, 109783.

Orr, F. M. (2015). Quadrennial technology review 2015. Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. Washington: US Department of Energy.

Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. Cogent Engineering, 3(1), 1167990.

Park, K., Son, S., Oh, J., & Kim, S. (2022). Sustainable decommissioning strategies for nuclear power plants: A systematic literature review. Sustainability, 14(10), 5947.

Patil, Y. Y., Chougaonkar, M. P., & Raut, P. D. (2012). Demographic study around proposed jaitapur nuclear power plant, Maharashtra, India: A case study. Journal of Environmental Research and Development, 6(3A), 916-922.

Permana, S., Trianti, N., & Rahmansyah, A. (2022). Nuclear Energy Contribution for Net Zero Emission and National Energy Mix 2060 in Indonesia. Journal of Physics: Conference Series, 2243, 012066.

Phispal, R. (2013). Pengaturan hukum internasional atas pemanfaatan tenaga nuklir dan dampak lingkungan yang mungkin ditimbulkan. Lex et Societatis, 1(5), 121-131.

Piera, M., Lafuente, A., Abánades, A., & Martinez-Val, J. M. (2010). Hybrid reactors: Nuclear breeding or energy production?. Energy Conversion and Management, 51(9), 1758-1763.

Pioro, I. (Ed.) (2022). Handbook of Generation IV Nuclear Reactors: A Guidebook. Woodhead Publishing.

Pourimani, R., & Davoodmaghami, T. (2018). Radiological hazard resulting from natural radioactivity of soil in east of Shazand power plant. Iranian Journal of Medical Physics, 15(3), 192-199.

Pramudhita, A. N., Asmara, R. A., Siradjuddin, I., & Rohadi, E. (2018). Internet of Things integration in smart grid. The 2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST). IEEE.

Price, J., Keppo, I., & Dodds, P. E. (2023). The role of new nuclear power in the UK's net-zero emissions energy system. Energy, 262, 125450.

Putero, S. H., Rosita, W., Sihana, F., Santosa, H. B., & Muharini, A. (2013). The challenges and opportunities in developing nuclear engineering education in Indonesia after Fukushima accident. International Conference on Nuclear Engineering, 55829, V005T12A002.

Puthiyavinayagam, P., Selvaraj, P., Balasubramaniyan, V., Raghupathy, S., Velusamy, K., Devan, K., ... & Bhaduri, A. K. (2017). Development of fast breeder reactor technology in India. Progress in Nuclear Energy, 101, 19-42.

Putri, N. M. K., Bambang, J. S., & Aritonang, S. (2022). Uranium and Thorium potential for Indonesia's Future Energy Security. International Journal of Education and Social Science Research, 5(1), 235-251.

Reed, B. C. (2014). The history and science of the Manhattan Project. Berlin: Springer.

Rehman, A., Ma, H., Ozturk, I., & Radulescu, M. (2022). Revealing the dynamic effects of fossil fuel energy, nuclear energy, renewable energy, and carbon emissions on Pakistan's economic growth. Environmental Science and Pollution Research, 29(32), 48784-48794.

Renn, O., & Marshall, J. P. (2016). Coal, nuclear and renewable energy policies in Germany: From the 1950s to the "Energiewende". Energy Policy, 99, 224-232.

Rhodes, R. (2018). Why nuclear power must be part of the energy solution. Yale Environment, 360, 19.

Rial, A., & Mudjiono, M. (2016). Opini pembangunan PLTN di Indonesia dalam tinjauan tingkat penerimaan masyarakat terhadap iptek nuklir. Buletin BATAN, 37,45-52.

Ringstad, A. J., & Szameitat, S. (2000). A comparative study of accident and near miss reporting systems in the German nuclear industry and the Norwgian offshore industry. In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 44, 27, 380-383.

Ringstad, A. J., & Szameitat, S. (2000). A Comparative Study of Accident and near Miss Reporting Systems in the German Nuclear Industry and the Norwgian Offshore Industry. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 44(27), 380-383.

Rizani, N. (2017). The Smiling Buddha: How India refused the Nuclear NonProfileration Treaty. Jurnal Sentris, 2(2), 14-24.

Riznic, J. (Ed.). (2017). Steam generators for nuclear power plants. Woodhead Publishing.

Rogers, Z., Kelly, T. G., Rogers, D. S., & Carter, C. R. (2007). Alternative fuels: are they achievable?. International Journal of Logistics Research and Applications, 10(3), 269-282.

Römer, B., Julliard, Y., Fauzianto, R., Poddey, M. J., & Rendroyoko, I. (2017). Pioneering smart grids for Indonesia–the case of a smart grid roadmap development.

CIRED-Open Access Proceedings Journal, 2017(1), 2484-2487.

Rustam, I., Sabilla, K. R., & Anam, S. (2023). Climate change adaptation assistance to a number of environmental communities in Mataram City in supporting NTB's commitment to net zero emission. Prospect: Jurnal Pemberdayaan Masyarakat, 2(1), 67-83.

Ruth, M. F., Zinaman, O. R., Antkowiak, M., Boardman, R. D., Cherry, R. S., & Bazilian, M. D. (2014). Nuclear-renewable hybrid energy systems: Opportunities, interconnections, and needs. Energy Conversion and Management, 78, 684-694.

Sadekin, S., Zaman, S., Mahfuz, M., & Sarkar, R. (2019). Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review. Energy Procedia, 160, 513-518.

Schmid, S. D. (2015). Producing power: The pre-Chernobyl history of the Soviet nuclear industry. MIT Press.

Schneider, M., & Froggatt, A. (2021). The world nuclear industry status report 2019. World Scientific Encyclopedia of Climate Change: Case Studies of Climate Risk, Action, and Opportunity Volume 2. World Scientific.

Schulenberg, T., & Starflinger, J. (2014). High performance light water reactor: design and analyses. KIT Scientific Publishing.

Schüring, M. (2013). Advertising the nuclear venture: the rhetorical and visual public relation strategies of the German nuclear industry in the 1970s and 1980s. History and technology, 29(4), 369-398.

Sehgal, B. R. (2006). Light water reactor (LWR) safety. Nuclear Engineering and Technology, 38(8), 697-732.

Seier, M., & Zimmermann, T. (2014). Environmental impacts of decommissioning nuclear power plants: methodical challenges, case study, and implications. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(12), 1919-1932.

Serp, J., Allibert, M., Beneš, O., Delpech, S., Feynberg, O., Ghetta, V., ... & Zhimin, D. (2014). The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives. Progress in Nuclear Energy, 77, 308-319.

Setyowati, A. B. (2021). Mitigating inequality with emissions? Exploring energy justice and financing transitions to low carbon energy in Indonesia. Energy Research & Social Science, 71, 101817.

Sinaga, D. H., Sasue, R. R. O., & Hutahaean, H. D. (2021). Pemanfaatan energi terbarukan dengan menerapkan smart grid sebagai jaringan listrik masa depan. Journal Zetroem, 3(1), 11-17.

Sipahutar, T. A. (2020). Indonesia's Foreign policy towards the Nuclear Nonproliferation Treaty (NPT). International Journal on Social Science, Economics and Art, 10(1), 10-17.

Smith, C. F., & Cinotti, L. (2016). Lead-cooled fast reactor. Handbook of Generation IV Nuclear Reactors. Woodhead Publishing.

Song, J. H., Shen, W., Griffiths, M., Rhee, B. W., Song, Y., & Naitoh, M. (2016). Advanced PHWR safety technology: PHWR challenging issues for safe operation and long-term sustainability. Science and Technology of Nuclear Installations, 1(1), 134-140.

Sovacool, B. K., Burke, M., Baker, L., Kotikalapudi, C. K., & Wlokas, H. (2017). New frontiers and conceptual frameworks for energy justice. Energy Policy, 105, 677-691.

Sriyana, S., & Nurlaila, N. (2003). Strategi alih teknologi PLTN: Belajar dari pengalaman Korea. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, 5(2): 43-54.

Stainsby, R., Peers, K., Mitchell, C., Poette, C., Mikityuk, K., & Somers, J. (2009). Gas cooled fast reactor research and development in the European Union. Science and Technology of Nuclear Installations, 2009, 238624.

Stančin, H., Mikulčić, H., Wang, X., & Duić, N. (2020). A review on alternative fuels in future energy system. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 128, 109927.

Stout, S., & Wang, Z. (2016). Standard handbook oil spill environmental forensics: fingerprinting and source identification. Academic press.

Sugiawan, Y., & Managi, S. (2019). Public acceptance of nuclear power plants in Indonesia: Portraying the role of a multilevel governance system. Energy Strategy Reviews, 26, 100427.

Sugiyono, A. (2010). Peran PLTN dalam mendukung komitmen pemerintah untuk mengurangi emisi CO2. Prosiding Seminar Pengembangan Energi Nuklir Tahun. BATAN.

Sulistiawati, L. Y. (2020). Indonesia's climate change national determined contributions, a farfetch dream or possible reality?. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,423, 012022.

Susanto, D. A., & Louhenapessy, B. B. (2014). Ketersediaan Standar dalam Mendukung Penerapan Sistem Smart Grid di Indonesia. Jurnal Standardisasi, 16(2), 147-158.

Susdarwono, E. T. (2021). Reaksi fisi dan reaksi fusi dalam mekanisme bom atom dan senjata termonuklir. Vektor: Jurnal Pendidikan IPA, 2(1), 16-30.

Susiati, H., Dede, M., Widiawaty, M. A., Ismail, A., & Udiyani, P. M. (2022a). Site suitability-based spatial-weighted multicriteria analysis for nuclear power plants in Indonesia. Heliyon, 8(3), e09088.

Susiati, H., Dede, M., Widiawaty, M. A., Risko, & Udiyani, P. M. (2022b). TSS in West Kalimantan based on remote sensing data: A preliminary study for siting nuclear power plant. AIP Conference Proceedings, 2501, 1, 020005.

Susiati, H., Widiawaty, M. A., Dede, M., Akbar, A. A., & Udiyani, P. M. (2022c). Modeling of shoreline changes in West Kalimantan using remote sensing and historical maps.

International Journal of Conservation Science, 13(3), 1043-1056.

Syaeful, H., & Suharji, S. (2018). Geostatistics application on uranium resources classification: case study of Rabau Hulu Sector, Kalan, West Kalimantan. Eksplorium: Buletin Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir, 39 (2), 131-140.

Syaeful, H., Sukadana, I. G., Susilo, Y. S. B., Indrastomo, F. D., & Muhammad, A. G. (2021). Uranium exploration, deposit and resources: The key of nuclear power plant development program in Indonesia. Journal of Physics: Conference Series, 2048, 012003.

Syahputra, E. (2022). Blockchain Energy for Future Smart Grid in Indonesia: A Brief Review. In 2022 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP). IEEE.

Sylvia, D. (2021). Politik Nuklir di Indonesia Masa Sukarno, 1958-1967. Lembaran Sejarah, 17(1), 114-122.

Takeda, S., Sakurai, S., Yamamoto, Y., Kasada, R., & Konishi, S. (2016). Limitation of fusion power plant installation on future power grids under the effect of renewable and nuclear power sources. Fusion Engineering and Design, 109, 1754-1758.

Tashlykov, O., Sheklein, S., Chentsov, A. S. A., Nosov, Y., & Smyshlaeva, O. (2014). Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 190, 907-918.

Theriault, K. (2016). Boiling water reactors. Nuclear engineering handbook. New York: CRC Press.

Thomas, V., & López, R. (2015). Global increase in climate-related disasters. Asian Development Bank Economics Working Paper Series, 466.

Tokimatsu, K., Fujino, J. I., Konishi, S., Ogawa, Y., & Yamaji, K. (2003). Role of nuclear fusion in future energy systems and

the environment under future uncertainties. Energy Policy, 31(8), 775-797.

Tubiello, F. N., Salvatore, M., Cóndor Golec, R. D., Ferrara, A., Rossi, S., Biancalani, R., ... & Flammini, A. (2014). Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks. Rome: UNCCD.

US EIA. (2021). Electric power sector CO2 emissions drop as generation mix shifts from coal to natural gas. Retrieved from https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=48296.

Vahidfar, N., Farzanefar, S., Ahmadzadehfar, H., Molloy, E. N., & Eppard, E. (2022). A Review of Nuclear Medicine Approaches in the Diagnosis and the Treatment of Gynecological Malignancies. Cancers, 14(7), 1779.

Varga, Z., Wallenius, M., Krachler, M., Rauff-Nisthar, N., Fongaro, L., Knott, A., Nicholl, A., & Mayer, K. (2022). Trends and perspectives in nuclear forensic science. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 146, 116503.

Velikhov, E. P. (2014). Fusion–fission hybrid systems and molten salt technologies in large-scale nuclear energy. Proceeding of 25th IAEA International Conference on Fusion Energy. Vienna: International Atomic Energy Agency.

Veza, I., Abas, M. A., Djamari, D. W., Tamaldin, N., Endrasari, F., Budiman, B. A., ... & Aziz, M. (2022). Electric vehicles in malaysia and indonesia: opportunities and challenges. Energies, 15(7), 2564.

Vujić, J., Bergmann, R. M., Škoda, R., & Miletić, M. (2012). Small modular reactors: Simpler, safer, cheaper?. Energy, 45(1), 288-295.

Walhi. (2018). Sesat pikir dan kebohongan publik BATAN dan para promotor PLTN di Indonesia. Wahana Lingkungan Hidup Indonesia.

Walker, J. S. (2004). Three Mile Island: A nuclear crisis in historical perspective (Vol. 41). University of California Press.

Wallbridge, S., Banford, A., & Azapagic, A. (2013). Life cycle environmental impacts of decommissioning Magnox nuclear power plants in the UK. The International Journal of Life Cycle Assessment, 18, 990-1008.

Warner, E. S., & Heath, G. A. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions of nuclear electricity generation: Systematic review and harmonization. Journal of Industrial Ecology, 16, S73-S92.

Widiawaty, M. A. (2019). Mari mengenal sains informasi geografis. Aria Mandiri Group.

Widiawaty, M. A., Lam, K. C., Dede, M., & Asnawi, N. H. (2022). Spatial differentiation and determinants of COVID-19 in Indonesia. BMC Public Health, 22(1), 1-16.

Widiawaty, M. A., Nurhanifah, N., Ismail, A., & Dede, M. (2020). The The impact of Cirebon coal-fired power plants on water quality in Mundu Bay, Cirebon Regency. Sustinere: Journal of Environment and Sustainability, 4(3), 189-204.

Wilkinson, J., & Herrera, S. (2010). Biofuels in Brazil: debates and impacts. The Journal of Peasant Studies, 37(4), 749-768.

Wisnubroto, D. S., Zamroni, H., Sumarbagiono, R., & Nurliati, G. (2021). Challenges of implementing the policy and strategy for management of radioactive waste and nuclear spent fuel in Indonesia. Nuclear Engineering and Technology, 53(2), 549-561.

World Nuclear Association. (2022). Pressurized heavy water reactors (PHWRs). Retrieved from https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/pressurized-heavy-water-reactors-phwrs.aspx

Wu, S., Liu, Z., Du, J., & Liu, Y. (2022). Change of Global Ocean Temperature and Decadal Variability under 1.5° C Warming in FOAM. Journal of Marine Science and Engineering, 10(9), 1231.

Wu, W. T., Pan, C. Y., Chang, S. L., Chen, Y. H., Tung, C. J., & Lin, P. (2023). Study protocol for radiation exposure and cancer

risk assessment: The Taiwan Nuclear Power Plants and Epidemiology Cohort Study (TNPECS). Journal of Epidemiology, 33(1), 52-61.

Xiao, Q., Liu, H., & Feldman, M. W. (2017). How does trust affect acceptance of a nuclear power plant (NPP): A survey among people living with Qinshan NPP in China. PloS One, 12(11), e0187941.

Yaar, I., Walter, A., Sanders, Y., Felus, Y., Calvo, R., & Hamiel, Y. (2016). Possible sites for future nuclear power plants in Israel. Nuclear Engineering and Design, 298, 90-98.

Yan, X., Sato, H., Inaba, Y., Noguchi, H., Tachibana, Y., & Kunitomi, K. (2014). Evaluation of GTHTR300A nuclear power plant design with dry cooling. International Journal of Energy Research, 38(11), 1467-1477.

Yang, J. E. (2018). Multi-unit risk assessment of nuclear power plants: Current status and issues. Nuclear Engineering and Technology, 50(8), 1199-1209.

Zablotska, L. B., Lane, R. S. D., & Thompson, P. A. (2014). A reanalysis of cancer mortality in Canadian nuclear workers (1956–1994) based on revised exposure and cohort data. British Journal of Cancer, 110(1), 214-223.

Zhang, C., Yang, H., Zhao, Y., Ma, L., Larson, E. D., & Greig, C. (2022). Realizing ambitions: A framework for iteratively assessing and communicating national decarbonization progress. Iscience, 25(1).

Zimmermann, F., & Keles, D. (2023). State or market: Investments in new nuclear power plants in France and their domestic and cross-border effects. Energy Policy, 173, 113403.

Zubair, M., Al-Suwaidi, R. R., & Al-Souqi, A. A. (2021). Behavior of Emergency Core Cooling System (ECCS) during the early stage of Loss of Coolant Accident (LOCA) for APR 1400 with Flownex software. Progress in Nuclear Energy, 141, 103949.

TENTANG PENULIS DAN EDITOR

HENI SUSIATI

Merupakan mantan peneliti di Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Saat ini aktif sebagai peneliti di Direktorat Kebijakan Pembangunan Lingkungan Hidup, Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran, BRIN. Heni merupakan lulusan Universitas Gadjah Mada serta Universitas Indonesia. Beliau juga merupakan mahasiswa aktif di Program Doktoral Ilmu Lingkungan, Universitas Padjadjaran sejak Februari 2023. Heni banyak terlibat dalam penelitian lingkungan hidup dan ketenaganukliran.

SRIYANA

Berprofesi sebagai peneliti di Direktorat Kebijakan Pembangunan Lingkungan Hidup, Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran, BRIN. Sebelumnya ditempatkan di Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, BATAN. Beliau pernah melakukan penelitian tentang geologi lingkungan pada evaluasi tapak fasilitas nuklir dan penentuan kedalaman batuan dasar dengan menggunakan metode

gravitasi. Sriyana merupakan peneliti lulusan Universitas Gadjah Mada dan Institut Teknologi Bandung.

MUHAMMAD SETIAWAN BAHARI

Adalah lulusan dari Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir, sekarang dikenal sebagai Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia. Setiawan merupakan mantan peneliti BATAN yang sekarang aktif di Direktorat Kebijakan Pembangunan Lingkungan Hidup, Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran, BRIN. Beliau memiliki minat penelitian pada bidang teknofisika nuklir.

FEPRIADI

Dikenal sebagai pegawai fungsional di Direktorat Kebijakan Pembangunan Lingkungan Hidup, Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran, BRIN. Beliau merupakan lulusan dari Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir. Fepriadi pernah sebelumnya aktif di Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, BATAN.

MOCH. DJOKO BIRMANO

Merupakan mantan peneliti BATAN yang saat ini aktif di Direktorat Kebijakan Pembangunan Lingkungan Hidup, Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran, BRIN. Djoko merupakan lulusan Teknik Nuklir dari Universitas Gadjah Mada untuk jenjang sarjana, serta memperoleh gelar magister dari Hiroshima University. Beliau fokus pada bidang kajian energi nuklir.

DEDY PRIAMBODO

Berperan sebagai peneliti di Direktorat Kebijakan Pembangunan Lingkungan Hidup, Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran, BRIN. Sebelumnya beliau pernah berkarya di Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, BATAN. Dedy memiliki gelar keilmuan dari Universitas Diponegoro dan Universitas Indonesia. Sebagai peneliti, beliau fokus pada kajian tentang *engineering processes and sustainable energy*.

YOHANES DWI ANGGORO

Adalah lulusan dari Universitas Jenderal Soedirman yang berkarir di Direktorat Kebijakan Pembangunan Lingkungan Hidup, Kemaritiman, Sumber Daya Alam, dan Ketenaganukliran, BRIN. Sebelumnya pernah aktif sebagai peneliti di Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, BATAN. Dwi berpengalaman dalam analisis dan perancangan sistem informasi energi nuklir di Indonesia.

SUPARMAN

Dikenal sebagai pengembang teknologi nuklir di BRIN. Beliau terlibat dalam studi pembentukan *Nuclear Energy Program Implementing Organization* (NEPIO) untuk mempersiapkan pengembangan energi nuklir di Indonesia. Suparman merupakan lulusan program S3 Teknik Elektro dari Universitas Gadjah Mada.

ADE CHANDRA LESMANA

Merupakan seorang peneliti di BRIN. Ade memperoleh pendidikan teknik nuklir dari Universitas Gadjah Mada. Beliau memiliki pengalaman dalam pemodelan sistem energi, penilaian energi, dan formulasi kebijakan berbasis bukti.

AGUS ARYANTO

Berperan sebagai ahli farmasi (apoteker nuklir) di BRIN. Agus bekerja di bidang produksi radiofarmaka, yaitu obat-obatan yang mengandung zat radioaktif yang digunakan untuk diagnosis dan terapi penyakit.

MILLARY AGUNG WIDIAWATY

Merupakan lulusan dari Universitas Pendidikan Indonesia. Beliau telah banyak terlibat penelitian tentang dinamika pesisir, lingkungan hidup, pendidikan, sistem informasi geografis, serta sosial-budaya di Indonesia. Millary aktif bekerja sama dengan banyak dosen/peneliti dari beberapa kampus serta lembaga penelitian di Indonesia dan Malaysia.

MOH. DEDE

Adalah seorang dosen pada Fakultas Pendidikan Ilmu Pengetahuan Sosial (FPIPS), Universitas Pendidikan Indonesia. Dede saat ini sedang menempuh studi lanjut di Program Doktoral Ilmu Lingkungan, Universitas Padjadjaran. Beliau fokus pada kajian lansekap, layanan ekosistem, serta lintas keilmuan (multidisplin) khususnya di bidang penyimpangan sosial dan pariwisata berkelanjutan.

UNIVERSITAS ISLAM MALANG

UNISMA

MALANG – JAWA TIMUR – INDONESIA

https://unisma.ac.id

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir di Indonesia

Upaya Berkelanjutan Menuju *Net Zero Emission*

Buku ini memberikan pemahaman tentang potensi energi nuklir sebagai solusi dalam mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan dan pengurangan emisi karbon. Dari dasar-dasar reaksi nuklir hingga pengaplikasiannya dalam berbagai bidang, termasuk energi, pembaca akan dipandu untuk menyongsong kesiapan infrastruktur untuk pembangunan PLTN di Indonesia. Dengan pengalaman dari negara-negara lain dan konsep FOLU Net Sink, buku ini menggambarkan bagaimana penggunaan energi nuklir dapat menjadi jawaban atas tantangan perubahan iklim. Namun, tantangan yang muncul, seperti ketergantungan pada teknologi dan bahan bakar dari negara lain, masalah keamanan dan risiko lingkungan, dan masalah sosial dan politik, juga disajikan dengan jelas. Meskipun demikian, buku ini menunjukkan bahwa dengan pengelolaan risiko yang efektif dan penerapan standar keselamatan yang tinggi, energi nuklir dapat menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan energi dunia yang semakin meningkat dan untuk mengurangi emisi karbon. Buku ini akan memberikan wawasan berharga bagi siapa saja yang tertarik dalam pengembangan energi nuklir dan tujuan pembangunan berkelanjutan secara global.

UNISMA PRESS

Unisma Press
Gedung Umar bin Khattab, Kantor Pusat Lantai 3
Jl. Mayjend Haryono No. 193 Malang 65144
Telp. 0341-551932 | unismapress@unisma.ac.id

Teknik Nuklir

ISBN 978-623-5498-12-6

9 786235 498126